



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE
DINÂMICO DE CONCRETO PRODUZIDO COM
AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO**

JOANA KIRCHNER BENETTI

São Leopoldo, Janeiro de 2012.

Ficha catalográfica

B465a Benetti, Joana Kirchner
Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto / por Joana Kirchner Benetti. – 2012.
83 f. : il., 30cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2012.

Orientação: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak ;
Coorientação: Prof^a Dr^a Marlova Piva Kulakowski.

1. Concreto. 2. Reciclagem. 3. Agregado reciclado de concreto. 4. Módulo de elasticidade dinâmico. 5. Corpo-de-prova - Umidade. I. Título.

CDU 691.32

Catálogo na Fonte:
Bibliotecária Vanessa Borges Nunes - CRB 10/1556

JOANA KIRCHNER BENETTI

**AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO
DE CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADO GRAÚDO
RECICLADO DE CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Co-Orientador: Profa. Dra. Marlova Piva Kulakowski

Banca examinadora: Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr
Prof. Dra. Fernanda Macedo Pereira

São Leopoldo, Janeiro de 2012.

JOANA KIRCHNER BENETTI

**“AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE
DINÂMICO DE CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADO
GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO”.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 13 de janeiro de 2012.



Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Orientador

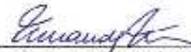


Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Coordenador de PPGEC/UNISINOS



Profa. Dra. Marlova Piva Kulakowski
Coorientadora

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Fernanda Macedo Pereira



Prof. Dr. Luiz Roberto Prudente Júnior

Dedico esta dissertação a todos que me ajudaram, me apoiaram ou pelo menos torceram por mim para que eu um dia obtivesse esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer a minha querida mãe, por ter sido a maior incentivadora desta conquista e por estar sempre ao meu lado me apoiando em todos os momentos.

Ao meu irmão Rafael, pela amizade e parceria.

Ao meu namorado Vinicius, por todo amor, carinho e principalmente compreensão nos momentos de ausência.

Ao meu querido orientador, professor Claudio de Souza Kazmierczak, agradeço pela confiança, pela paciência e principalmente pelos ensinamentos. Um exemplo a ser seguido.

À co-orientadora, Marlova Piva Kulakoswki pelas palavras de apoio e pelos ensinamentos.

Ao Laboratório de Materiais da Engenharia Civil e seus funcionários.

Aos bolsistas de iniciação científica, Thiago e Ezequiel pela ajuda na realização dos ensaios.

Ao Banco Santander, pela concessão da bolsa de estudos.

À CSL – Construtora Sacchi S.A, por me liberar de minhas atividades na empresa para poder realizar o mestrado.

Às minhas queridas amigas Simone e Karina, por compartilharem os momentos bons e também aqueles mais difíceis, no decorrer do mestrado.

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	16
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	16
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	16
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	18
2.1.1	<i>Definições, geração e impactos</i>	18
2.1.2	<i>Resíduos de concreto</i>	20
2.1.3	<i>Resíduos de concreto</i>	21
2.2	PROPRIEDADES DOS AGREGADOS PROVENIENTES DE CONCRETO	23
2.3	CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	24
2.4	MÓDULO DE ELASTICIDADE	27
2.4.1	<i>Tipos de Módulos de Elasticidade</i>	31
2.4.2	<i>Módulo de elasticidade de concretos com ARC</i>	39
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	43
3.1	MATERIAIS	44
3.1.1	<i>Cimento e pozolanas</i>	44
3.1.2	<i>Água</i>	44
3.1.3	<i>Aditivo</i>	44
3.1.4	<i>Agregado Graúdo Natural (AN)</i>	44
3.1.5	<i>Agregado Miúdo Natural</i>	45
3.1.6	<i>Agregado Reciclado de Concreto (ARC)</i>	45
3.2	PRODUÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	46
3.3	MÉTODOS	47
3.3.1	<i>Planejamento estatístico</i>	47
3.3.2	<i>Determinação do módulo de elasticidade dinâmico</i>	48
3.3.3	<i>Determinação da resistência à compressão</i>	50
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
4.1	RESULTADOS DO GRUPO A	51
4.2	RESULTADOS DO GRUPO B	59
5	CONCLUSÃO	68
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
	ANEXOS	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Módulo de elasticidade do concreto (GPa).....	33
Tabela 2 – Estimativa dos módulos de deformação estático e dinâmico do concreto em função da velocidade ultra-sônica.....	33
Tabela 3 – Comparação entre procedimentos de normas para ensaio de ultra-som.....	34
Tabela 4 – Modelos Empíricos de predição do módulo de elasticidade.....	38
Tabela 5 – Comparação entre módulo de elasticidade experimental e estimado.....	39
Tabela 6 – Módulo de elasticidade do concreto (GPa).....	40
Tabela 7 – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto.....	41
Tabela 8 – Corpos de prova do grupo A.....	47
Tabela 9 – Corpos de prova do Grupo B.....	47
Tabela 10 – Resultados dos ensaios para diferentes tipos de resíduos – Grupo A.....	51
Tabela 11 – Estatística descritiva e ANOVA do módulo de elasticidade em função dos diferentes tipos de ARC.....	53
Tabela 12 – Estatística descritiva e teste Tukey do módulo de elasticidade em função do tipo de resíduo.....	53
Tabela 13 – Estatística descritiva e Teste t de Student do módulo de elasticidade em função da condição de umidade.....	54
Tabela 14 – Estatística descritiva do módulo de elasticidade e ANOVA dos diferentes traços.....	54
Tabela 15 - Estatística descritiva, ANOVA e teste Tukey da resistência à compressão.....	55
Tabela 16 - Correlação do módulo de elasticidade com a resistência a compressão - Grupo B.....	57
Tabela 17– Resultados do Grupo B para ARC de 18 MPa.....	59
Tabela 18– Resultados do Grupo B para ARC de 50 MPa.....	60
Tabela 19 - Estatística descritiva e ANOVA do módulo de elasticidade em função das diferentes quantidades de resíduos.....	61
Tabela 20 - Comparação múltipla das médias do módulo de elasticidade nos diferentes teores de substituição de ARC pelo teste Tukey.....	62
Tabela 21 - Estatística descritiva e Teste t de Student do módulo de elasticidade dos corpos-de-prova ensaiados no estado úmido e seco de diferentes resistências do ARC.....	63
Tabela 22 - Estatística descritiva e Teste t de Student do módulo de elasticidade - ensaios com a mesma quantidade de resíduos e diferentes resistências de ARC.....	64
Tabela 23 - Estatística descritiva e ANOVA da resistência à compressão do Grupo B.....	64
Tabela 24 - Comparação múltipla das médias da resistência a compressão nos diferentes teores de substituição de ARC com teste Tukey do Grupo B.....	65
Tabela 25 - Correlação do módulo de elasticidade com a resistência à compressão dos diferentes teores de substituição de ARC – Grupo B.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Organograma da pesquisa com ARC na UNISINOS.	14
Figura 2 - Representação esquemática do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial.	29
Figura 3 - Taxa de crescimento da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto.	30
Figura 4 - Parâmetros que influenciam o módulo de elasticidade.	31
Figura 5 - Tipos de representação do módulo de elasticidade.	32
Figura 6 - Velocidade ultra-sônica em concretos dosados com diferentes diâmetros de agregados e diferentes tempos de cura.	36
Figura 7 - Relação entre a velocidade de propagação de pulsos ultra-sônicos e teor de água.	37
Figura 8 - Módulo de elasticidade de diferentes classes de concreto em função do teor do agregado reciclado.	41
Figura 9 - Módulo de elasticidade com relação a diferentes teores de substituição de AN por ARC em diferentes condições de cura.	42
Figura 10 - Ensaio para verificação da velocidade da onda ultra-sônica.	49
Figura 11 - Módulo de elasticidade dinâmico segundo a velocidade em m/s: comparação dos dados do Grupo A com e BS 1881 Part 203(1986).	52
Figura 12 - Relação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade dos corpos de prova ensaiados secos e úmidos.	56
Figura 13 - Correlação entre os valores da resistência à compressão e módulo de elasticidade.	58
Figura 14 - Módulo de elasticidade dinâmico segundo a velocidade em m/s: comparação dos dados do Grupo B com e BS 1881 Part 203(1986).	61
Figura 15 - Relação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade dos corpos-de-prova ensaiados no estado seco e úmido – ARC 18 MPa (a/c 0,85)	65
Figura 16 - Relação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade dos corpos-de-prova ensaiados no estado seco e úmido – ARC 50 MPa (a/c 0,85)	66

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/C – Relação Água/ cimento
AGCR – Agregados graúdos de concreto reciclado
AGN – Agregados graúdos naturais
AN – Agregado Natural
ANOVA - Análise de Variância
ARC – Agregado Reciclado de Concreto
ASTM – American Society for Testing and Materials
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP V ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
Fc – Resistência à compressão
FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos
IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto
MED – Módulo de Elasticidade Dinâmico
MEE – Módulo de Elasticidade Estático
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa – Mega Pascal
NBR – Norma Brasileira Regulamentada
PPGEC – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil
RCA – Resistência à Compressão Axial
RCC - Resíduos de Concreto plástico, com cura convencional ao ar
RCD – Resíduos de construção e demolição
RCT – Resíduo de Concreto Seco, com Cura Térmica à vapor de água.
REF - Referência
RS – Rio Grande do Sul
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

RESUMO

BENETTI, J.K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. São Leopoldo, 2012. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2012.

O setor da construção civil apresenta um grande potencial de geração de resíduos sólidos, caracterizando-se como um dos maiores geradores deste material no mundo. Por este motivo, é importante adotar um novo modelo de desenvolvimento, que busque, gradativamente, a não geração e a minimização de resíduo, assim como alternativas para o reaproveitamento destes resíduos na própria construção civil, e, assim, atingir um desenvolvimento mais sustentável. Neste contexto, muitos estudos sobre o concreto confeccionado com agregados reciclados de concreto vêm sendo desenvolvidos, tanto em nível nacional como internacional. Entretanto, é possível perceber que a maior parte das pesquisas tem seu foco voltado para a resistência à compressão e à tração, sendo mais escassos aqueles que dão ênfase para o comportamento elástico destes concretos. Frente ao exposto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o módulo de elasticidade dinâmico de concretos produzidos com a utilização de agregado reciclado de concreto. Para tanto, confeccionou-se concretos que foram divididos em dois grupos. Um dos grupos empregou agregados reciclados de duas resistências (18 e 50 MPa), que foram inseridos em um novo concreto de 32 MPa, nos teores de substituição de 25%, 50%, 75% e 100%. O outro grupo empregou dois tipos de resíduos, gerados em maior quantidade por uma indústria de pré-fabricados de concreto. Um deles é o resíduo de concreto plástico, com cura convencional ao ar, e o outro é o resíduo de concreto seco, com cura térmica à vapor de água, sendo que substituiu-se 50% em volume do agregado graúdo natural pelo reciclado, em três novos concretos de distintas resistências. O módulo de elasticidade dinâmico foi calculado conforme especificado na C597 (ASTM, 2009), sendo analisada a influência da umidade do concreto no momento do ensaio, do tipo de resíduo e do teor de substituição de agregado natural pelo reciclado no módulo de elasticidade dinâmico. O tipo de agregado reciclado de concreto influenciou o módulo de elasticidade dinâmico, assim como os diferentes teores de substituição e a umidade do concreto no momento do ensaio. Para os materiais avaliados, o módulo de elasticidade não variou em função da resistência à compressão do concreto que gerou o agregado reciclado de concreto, e verificou-se correlação positiva entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto.

Palavras-chave: concreto; reciclagem; agregado reciclado de concreto; módulo de elasticidade dinâmico; umidade do corpo-de-prova.

ABSTRACT

BENETTI, J.K. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete produced with recycled concrete aggregate. São Leopoldo, 2012. 83p. Thesis (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

The construction industry is one of the largest solid waste generator. For this reason, it is important to adopt a new model aiming for the reuse of construction waste and thereby achieve a more sustainable development. In this context, studies on concrete made with recycled aggregate concrete have been developed, focused to determine compressive strength and tensile strength, with little emphasis on the elastic behavior of concrete. This work aims to analyze the dynamic modulus of elasticity of concrete produced with waste concrete as aggregate. To this end, it was made two groups of concrete using two types of waste generated in larger quantities by an industry of prefabricated concrete. The first group was made with a residue of plastic concrete, air-cured, and concrete made with of heat curing. The concrete aggregates were used to replace 50% by volume of natural coarse aggregate. In the second group recycled aggregates was produced in two strengths (18 and 50 MPa), being used to produce a new concrete of 32 MPa. The levels of substitution were 25%, 50%, 75% and 100%. The dynamic modulus of elasticity was calculated as specified in C597 (ASTM, 2009). It was analyzed the influence of moisture content and the type of waste recycled aggregate replacement in the natural dynamic modulus of elasticity. The type of recycled aggregate influenced the dynamic modulus of elasticity, as well as different levels of moisture and replacement of concrete at the time of trial. For the materials tested, the modulus of elasticity did not vary as a function of the compressive strength of recycled aggregate concrete, but there was a positive correlation between the modulus of elasticity and compressive strength of concrete.

Key-words: concrete, recycled aggregate concrete, dynamic modulus of elasticity.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Mália, Brito e Bravo (2011), o setor da construção civil é o setor que consome mais matérias-primas e energia quando comparado a qualquer outra atividade econômica e, simultaneamente, é ele que produz a maioria dos resíduos gerados em todo o espaço urbano. Por este motivo, faz-se necessário encontrar novas alternativas para o reaproveitamento destes resíduos na própria construção civil, visando a obtenção de um desenvolvimento sustentável e auxiliando para que as gerações futuras também possam desfrutar de recursos disponíveis na natureza. Angulo et al. (2005) salientam que o RCD pode se constituir em uma fonte de matéria-prima alternativa para o setor, diminuindo a utilização de agregados naturais. Melo, Repette e Cincotto (2004) mencionam que “a busca de materiais alternativos que apresentem vantagens econômicas e ambientais tem sido uma vertente na indústria da construção civil, sendo alvo de inúmeras pesquisas e projetos”.

Para Ângulo, Zordan e John (2001), a reciclagem de resíduos de materiais de construção no Brasil, quando comparada aos países de primeiro mundo, era muito pequena. Uma realidade muito próxima a esta é observada ainda hoje. Azevedo, Kiperstok e Morais (2006), também salientam que no Brasil, a prática da reciclagem de RCD é pouco difundida. Apesar disso, Miranda, Ângulo e Careli (2009) colocam que a reciclagem de resíduos de construção e demolição tem se desenvolvido mais significativamente nos últimos cinco anos. Estes autores fizeram um estudo do panorama da reciclagem de RCD entre 1986 e 2008 no Brasil e concluíram que cerca de 1% das empresas nacionais já foram assistidas para a implantação de planos de gerenciamento de RCD em canteiros, sendo este percentual composto principalmente de construtoras de médio e grande porte. Num âmbito geral, a situação atual da reciclagem de RCD está relacionado a vários fatores, e dentre eles pode-se destacar a preocupação, nas discussões políticas, com problemas econômicos e sociais momentâneos, havendo pouca ênfase com relação às discussões de longo prazo, como a questão do desenvolvimento sustentável.

Com relação ao cenário internacional, segundo Kou, Poon e Etxeberria (2011), muitos países já introduziram medidas de legislação e política para incentivar o uso de agregados reciclados na construção civil. Entretanto, EUROSTAT (2009), coloca que em 2006 mais da metade dos resíduos gerados por empresas na União Européia correspondem ao setor da construção civil. Conforme Ortiz, Pasqualino e Castells (2010), 80% desses resíduos podem ser reciclados, mas apenas uma pequena porção é efetivamente reutilizada. Os mesmos

autores ainda colocam que na Espanha, cerca de 40 milhões de toneladas de resíduos são produzidas a cada ano, representando 32% do volume total de resíduos gerados.

Segundo Oliveira (2002), analisando-se uma quantidade de material descartado pelas obras de construção civil, conclui-se que, apesar de se tratar de uma massa bastante heterogênea, quase que a totalidade dos materiais que compõe a mesma é de alto valor agregado e de boa resistência mecânica, tais como: areias, pedras-britadas, concretos e argamassas endurecidos, tijolos e cacos cerâmicos, madeiras, entre outros. Sendo assim, o autor afirma que esses materiais descartados pelas obras de construção civil podem ser considerados grandes jazidas de matérias primas.

Considerando que o concreto é um dos materiais mais utilizados pelo homem no mundo, o reaproveitamento de resíduos deste material na formação de novos concretos pode gerar inúmeros benefícios. Dentre eles, pode-se destacar a redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, por conta da substituição por resíduos reciclados; a redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização do volume de resíduos pela reciclagem; a redução no consumo de energia; e a redução da poluição ambiental.

O concreto possui propriedades mecânicas que influenciam em sua eficiência e, por isso, estas se constituem na base para que seja dimensionada uma estrutura de concreto armado. Entretanto, estudos que vem sendo desenvolvidos comprovam a existência de diferenças entre as propriedades do concreto convencional e do produzido com agregado reciclado de concreto (ARC). Dentre estas propriedades, pode-se mencionar a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade. Esta última, segundo Mehta e Monteiro (2008), exerce influência significativa em um projeto estrutural, já que a referida propriedade está associada à deformação máxima permitida, antes de o material adquirir deformação permanente. Infelizmente, esta propriedade ainda é pouca estudada pelos pesquisadores, principalmente em se tratando de concretos reciclados.

Segundo Levy (2001), o engenheiro deve ter conhecimento a cerca da referida propriedade, uma vez que ela influi no cálculo estrutural. Quando o módulo é conhecido, é possível conhecer as flechas máximas admissíveis, permitindo a determinação dos limites do material, evitando, assim, possíveis problemas como a fissuração do concreto (LEVY, 2001).

Este trabalho é parte integrante do projeto de pesquisa “Ações de Inovação em Engenharia”, aprovado no âmbito do edital FINEP 06/2006, desenvolvido no PPGEC da UNISINOS, e que tem como objetivo viabilizar tecnicamente a inserção de resíduos de

construção e demolição (RCD) em matrizes cimentícias. O organograma da Figura 1 mostra a posição em que se encontra este trabalho no contexto da pesquisa desenvolvida na UNISINOS.

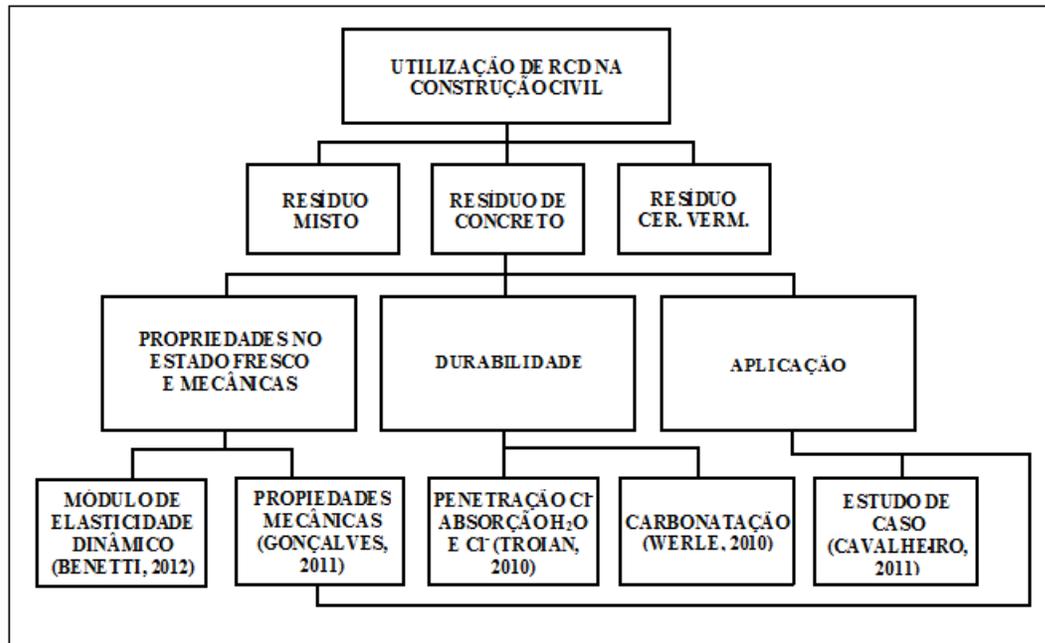


Figura 1 - Organograma da pesquisa com ARC na UNISINOS.

O grande tema da pesquisa engloba estudos sobre propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos com ARC. Estas propriedades foram pesquisadas nos trabalhos de Troian (2010), Werle (2010), Cavalheiro (2011) e Gonçalves (2011) e em outras pesquisas do projeto FINEP, e, dando continuidade aos estudos, o módulo de elasticidade dinâmico constitui-se no tema específico do presente trabalho.

1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo Ângulo et al. (2003), os RCD correspondem a mais de 50% dos resíduos sólidos urbanos (RSU), de tal forma que este material se constitua em um dos principais responsáveis pelo esgotamento de áreas de aterro. Além disso, o setor da construção civil exerce grande demanda por recursos naturais. Os agregados naturais estão entre os minerais mais consumidos no mundo, sendo que, no Brasil, são utilizados em torno de $380,6 \times 10^6$ t/ano dos mesmos (ÂNGULO et al., 2003). Corroborando, John (2000) estimou que em nosso país são utilizados cerca de 210 milhões de toneladas de agregados por ano, somente na produção de concretos e argamassas, ou seja, a este valor é necessário somar a quantidade de agregados utilizados em pavimentação, bem como as perdas. Segundo o Departamento

Nacional de Produção Mineral (2009), no final de 2007 a produção brasileira alcançou um total de 217 milhões de toneladas de rocha britada.

Portanto, devido ao fato de a construção civil ser um dos setores que mais gera impacto ambiental no mundo, seja pelo seu vasto consumo de matérias-primas naturais ou pela abundância de resíduos gerados, pesquisadores da área têm buscado alternativas que visam a minimização destes problemas. Para Lovato (2007), considerando a preocupação ambiental crescente nos últimos anos, impulsionada pela questão do desenvolvimento sustentável, é necessário que ocorram mudanças significativas no setor da construção civil.

Evangelista, Costa e Zanta (2010), comprovam em um estudo realizado em canteiros de obra na cidade de Salvador, Bahia que existem benefícios tanto econômicos quanto ambientais decorrentes da prática de reciclagem e que cerca de 80% do volume gerado pode ser convertido em agregado reciclado, que substitui o agregado natural. Portanto uma alternativa que pode vir a contribuir para a redução destes impactos é a absorção, por parte da própria construção civil, dos resíduos de um dos materiais mais utilizados nas obras, que é o concreto. Esse concreto pode, então, vir a ser empregado na forma de agregado reciclado, substituindo parte dos agregados naturais que seriam, normalmente, utilizados. De acordo com Zega, Zaccardi e Maio (2010), para que isso seja possível, a avaliação das propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade deste novo composto é uma questão fundamental.

A organização Cement Sustainability Initiative (CSI) foi estabelecida a partir de um esforço global constituída por 18 produtores de cimento líderes de mercado e está vinculada ao World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). A CSI publicou, em 2009, o documento Recycling Concrete, onde coloca como meta "aterro zero de concreto" e várias recomendações, entre elas pesquisar e desenvolver novas técnicas de reciclagem e emprego do resíduo.

Neste contexto, muitos estudos sobre o concreto confeccionado com agregados de RCD têm sido desenvolvidos a nível nacional e internacional (LEITE, 2001; LEVY, 2001; DOMINGO et al., 2010; TROIAN, 2010; WERLE, 2010 TOPÇU E GUNGAN, 1995; KATZ, 2003; KHATIB, 2005; ETXEBERRIA et al, 2007). Entretanto, é possível perceber que a maior parte destas literaturas tem seu foco voltado para as características mecânicas do material, principalmente no que se refere à resistência a compressão e a tração, dando menos ênfase para o comportamento elástico destes concretos. Segundo Barbosa e Geyer (2010) a necessidade de conhecimento do módulo de deformação do concreto surgiu em decorrência de problemas estruturais em prédios, em virtude de deformações lentas e fluência. Além

disso, os sistemas estruturais de concreto dispõem cada vez mais de peças esbeltas, o que torna o estudo das deformações uma condição crítica para seu bom desempenho em serviço (MAGALHÃES ET AL, 2010). A partir disto, a presente pesquisa pretende contribuir para o conhecimento do módulo de elasticidade destes materiais, considerando que, até o momento, estas são pouco exploradas pelos pesquisadores, ao mesmo tempo em que são de grande relevância para os profissionais da área.

1.2 OBJETIVOS

Dada a contextualização do problema, a pesquisa tem os objetivos apresentados na sequência.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o módulo de elasticidade dinâmico de concretos produzidos com a utilização de agregados reciclados de concreto.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Analisar a influência do tipo de resíduo de concreto, utilizado como agregado, no módulo de elasticidade dinâmico;
- Verificar a influência dos diferentes teores de resíduo no módulo de elasticidade dinâmico;
- Determinar a existência de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado de concreto;
- Verificar a influência das condições de umidade do concreto no módulo de elasticidade dinâmico.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa está dividida em 5 capítulos, sendo que o primeiro contém a introdução do trabalho, a justificativa, objetivo principal e específicos, a estrutura da pesquisa e as delimitações do trabalho. O capítulo dois apresenta a revisão bibliográfica. Já o capítulo três contém a descrição dos materiais empregados no experimento e os métodos utilizados na execução da parte experimental. A apresentação dos resultados e a discussão dos mesmos encontram-se no capítulo quatro, e o capítulo cinco, destina-se as conclusões obtidas durante a análise dos resultados e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Diversos fatores influenciam no módulo de elasticidade dinâmico de concretos com agregados reciclados. Dentre os fatores que influenciam nesta propriedade, serão estudados os relacionados aos agregados graúdos, proveniente do processo de britagem do concreto.

Foram estudados concretos confeccionados com ARC de 18 e 50 MPa, com teores de substituição de 25%, 50%, 75% e 100% de agregado graúdo natural pelo reciclado. Também foram analisados concretos produzidos com um teor de 50% de substituição de ARC por resíduos de concreto plástico, com cura convencional e resíduos de concreto seco, com cura térmica à vapor de água.

As condições de umidade dos concretos para execução dos ensaios de módulo de elasticidade se limitam a dois extremos, empregando-se corpos-de-prova secos e saturados.

Foram realizados apenas ensaios visando a determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto, não tendo sido possível realizar a determinação dos respectivos módulos de elasticidade estático.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É apresentada neste capítulo a revisão bibliográfica que aborda os diversos assuntos relacionados a esta pesquisa, cujo foco é o comportamento elástico de concretos produzidos com a utilização de resíduos de outros concretos britados como agregado.

2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Neste item será abordado um panorama geral sobre os resíduos de construção e demolição e sobre os resíduos de concreto.

2.1.1 Definições, geração e impactos

A ABNT NBR 10004:2004, define como resíduos sólidos os “resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição”. Nesta mesma norma, em relação à classificação dos resíduos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, os resíduos de construção civil são enquadrados na Classe II B – Inertes.

No ano de 2002 foi elaborada a Resolução 307 do CONAMA (BRASIL, 2002) que tem como objetivo estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos de construção civil, disciplinando as ações necessárias para minimizar os impactos ambientais. Esta resolução define resíduos de construção civil da seguinte forma: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Estes resíduos são gerados de diversas formas e, conseqüentemente, possuem características diferentes, dependendo, também, da sua origem. Considerando isso, os resíduos de construção e demolição (RCD) são divididos em quatro classes (A, B, C e D), de acordo com a Resolução 307 do CONAMA, de 17 de julho de 2002: Classe A (resíduos reutilizáveis ou recicláveis); Classe B (resíduos recicláveis para outras destinações); Classe C (resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação); e Classe D (resíduos perigosos oriundos do processo de construção) (BRASIL, 2002). Cabe ressaltar que os resíduos enquadrados na Classe A são o foco da presente pesquisa. Tratam-se de resíduos reutilizáveis ou recicláveis

como agregado, oriundos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de edificações, e da fabricação ou demolição de pré-moldados produzidos em canteiros (BRASIL, 2002).

O impacto ambiental está relacionado ao desequilíbrio provocado pelo choque da relação do homem com o meio ambiente, estando presente de forma efetiva na construção civil, tendo em vista que este setor consome recursos naturais, de origem não renovável, e gera diferentes tipos de resíduos.

Ao relacionar a construção civil com o meio ambiente, percebe-se que o setor é responsável pela geração de grande quantidade de resíduos, e que todas as etapas do processo construtivo são potenciais causadores de impactos ambientais, desde a extração da matéria prima até o descarte dos resíduos por ela gerados (MORAIS, 2006). Ao mesmo tempo, sabe-se que este setor é importante, pois supre necessidades básicas do ser humano sendo, portanto, indispensável à sociedade. Frente ao exposto, faz-se necessário desenvolver novas técnicas e materiais a serem aplicados e utilizados no setor, visando reduzir os impactos ambientais que, atualmente, apresentam-se de forma significativa e conflitante com os preceitos da sustentabilidade ambiental.

Os elevados índices de perdas da construção civil também contribuem para o impacto, já que acarretam numa maior quantidade de RCD gerados, podendo ser classificadas como diretas, as quais são posteriormente removidas da obra (entulho), e indiretas, que por sua vez ficam incorporadas à obra (SOUZA, 1998 apud CASTRO; GÜNTHER 2004). Complementando essa afirmação, Pinto (1999) relata que na construção empresarial, a intensidade da perda se situa entre 20 e 30% da massa total de materiais, dependendo do patamar tecnológico do executor.

Sabe-se que os resíduos de construção e demolição constituem-se em potenciais agentes causadores de impacto ambiental já que, uma vez gerados e não reaproveitados na obra, os entulhos serão removidos e dispostos em outro local. Conforme o Ministério das Cidades (Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental), no Brasil, os RCD correspondem a grande parte da massa dos resíduos sólidos urbanos, representando de 51 a 70% do total. Pinto (1999) constatou, após avaliar 10 cidades brasileiras, que os resíduos de construção e demolição representam entre 41 e 70% do total de resíduo sólido municipal. Já Ângulo et al. (2003) constatou que mais de 50% dos RSU são RCD.

Além disso, a presença dos RCD cria um ambiente propício para a proliferação de vetores prejudiciais às condições de saneamento e à saúde humana. É comum, em locais de deposições irregulares, nos depararmos com a presença de roedores, insetos peçonhentos (aranhas e escorpiões) e insetos transmissores de endemias perigosas, como a dengue, já que eles encontram, nestes locais, proteção, alimento e água.

Outra consequência, como ressaltado por Silva e Arnosti (2006), é o fato de alguns compostos químicos, como Sulfatos e Nitratos, presentes em RCD, potencialmente virem a contaminar o solo e águas superficiais e subterrâneas. Esta contaminação pode gerar consequências graves, como a morte de micro organismos, plantas e animais do solo e, até mesmo, podendo afetar a saúde do ser humano.

2.1.2 Resíduos de concreto

Os resíduos de concreto podem ser provenientes de diferentes processos, como os de produção de estruturas e de elementos pré-fabricados; os de produção e fornecimento de concreto pré-misturado e os de demolição de estruturas e pavimentos.

Uma das principais fontes de concreto residual são as empresas de serviços de concretagem, ou centrais dosadoras de concreto (CDC), e, segundo Benini, Repette e Concotto (2007), um dos grandes problemas enfrentados pela indústria produtora deste material é o impacto ambiental que ela causa, principalmente com relação à grande quantidade de resíduos gerados. Os autores colocam, ainda, que as três principais origens de resíduos nas CDCs são: a lavagem interna do balão do caminhão betoneira ao final do dia de trabalho, a lavagem do pátio da central e a devolução de concretos frescos que não foram empregados nas obras. Se este concreto não é reaproveitado no estado fresco, gera resíduos do lodo de decantação da limpeza e de concreto endurecido. Somando-se a este volume, tem-se, ainda o resíduo gerado de corpos-de-prova ensaiados, empregados no controle da produção.

Já em uma fábrica de pré-moldados, conforme Buttler (2003), o resíduo de concreto é proveniente de elementos rejeitados pelo controle de qualidade, final de linhas de produção e sobras de concreto fresco ao final do processo. O mesmo autor coloca que, basicamente, há duas fontes de resíduos: os resíduos provenientes de concretos que foram adensados e os resíduos de concretos não-adensados.

Um estudo coordenado pelo DECC/USP (Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP) avaliou a questão do desperdício de materiais nos canteiros de obras. Os resultados mostraram que, com relação aos concretos produzidos

em obra e aos concretos produzidos em centrais, o índice de perdas foi igual a 6% e 9%, respectivamente. Benini (2007), citando dados da ABESC relativos a 2004, afirma que foram produzidos aproximadamente 17.500 mil m³ deste material, em mais de 600 centrais, e que em torno de 350 mil m³ do mesmo foi desperdiçado.

Buttler (2003) coloca que as pesquisas envolvendo agregados reciclados confirmam a grande aplicabilidade do material, especialmente quando se trata do agregado graúdo reciclado, tanto em aplicações não-estruturais como estruturais. Conforme Gonçalves (2011), a forma de reciclagem comumente utilizada para este tipo de resíduo, quando o mesmo se encontra no estado endurecido, é a sua reutilização como agregados em novas misturas ou para confecção de sub-bases e bases de rodovias. Porém, um dos entraves para a utilização destes materiais está relacionado à existência de poucas regulamentações normativas a respeito do mesmo.

Além disso, segundo Gonçalves (2011), para a utilização dos resíduos de concreto, é necessário que estes sejam beneficiados, pois os mesmos encontram-se, normalmente, em dimensões grandes e, portanto, inapropriados para o uso direto, além de apresentar outras características indesejáveis. Mesmo assim, apesar de esse processo acarretar em custos para as indústrias, Tam (2008) concluiu, com base em um estudo econômico, que a reciclagem de concreto para a utilização como agregado na produção de novos concretos pode ser uma alternativa viável economicamente. Além disso, este processo permite a geração de empregos e aumenta a competitividade da economia. Deve-se enfatizar que a reciclagem permite gerar valor a partir de um produto que, anteriormente, estava apenas associado a despesas (BUTTLER, 2003).

2.1.3 Resíduos de concreto

Os resíduos de concreto podem ser provenientes de diferentes processos, como os de produção de estruturas e de elementos pré-fabricados; os de produção e fornecimento de concreto pré-misturado e os de demolição de estruturas e pavimentos.

Uma das principais fontes de concreto residual são as empresas de serviços de concretagem, ou centrais dosadoras de concreto (CDC), e, segundo Benini, Repette e Concotto (2007), um dos grandes problemas enfrentados pela indústria produtora deste material é o impacto ambiental que ela causa, principalmente com relação à grande quantidade de resíduos gerados. Os autores colocam, ainda, que as três principais origens de resíduos nas CDCs são: a lavagem interna do balão do caminhão betoneira ao final do dia de

trabalho, a lavagem do pátio da central e a devolução de concretos frescos que não foram empregados nas obras. Se este concreto não é reaproveitado no estado fresco, gera resíduos do lodo de decantação da limpeza e de concreto endurecido. Somando-se a este volume, tem-se, ainda o resíduo gerado de corpos-de-prova ensaiados, empregados no controle da produção.

Já em uma fábrica de pré-moldados, conforme Buttler (2003), o resíduo de concreto é proveniente de elementos rejeitados pelo controle de qualidade, final de linhas de produção e sobras de concreto fresco ao final do processo. O mesmo autor coloca que, basicamente, há duas fontes de resíduos: os resíduos provenientes de concretos que foram adensados e os resíduos de concretos não-adensados.

Um estudo coordenado pelo DECC/USP (Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP) avaliou a questão do desperdício de materiais nos canteiros de obras. Os resultados mostraram que, com relação aos concretos produzidos em obra e aos concretos produzidos em centrais, o índice de perdas foi igual a 6% e 9%, respectivamente. Benini (2007), citando dados da ABESC relativos a 2004, afirma que foram produzidos aproximadamente 17.500 mil m³ deste material, em mais de 600 centrais, e que em torno de 350 mil m³ do mesmo foi desperdiçado.

Buttler (2003) coloca que as pesquisas envolvendo agregados reciclados confirmam a grande aplicabilidade do material, especialmente quando se trata do agregado gráudo reciclado, tanto em aplicações não-estruturais como estruturais. Conforme Gonçalves (2011), a forma de reciclagem comumente utilizada para este tipo de resíduo, quando o mesmo se encontra no estado endurecido, é a sua reutilização como agregados em novas misturas ou para confecção de sub-bases e bases de rodovias. Porém, um dos entraves para a utilização destes materiais está relacionado à existência de poucas regulamentações normativas a respeito do mesmo.

Além disso, segundo Gonçalves (2011), para a utilização dos resíduos de concreto, é necessário que estes sejam beneficiados, pois os mesmos encontram-se, normalmente, em dimensões grandes e, portanto, inapropriados para o uso direto, além de apresentar outras características indesejáveis. Mesmo assim, apesar de esse processo acarretar em custos para as indústrias, Tam (2008) concluiu, com base em um estudo econômico, que a reciclagem de concreto para a utilização como agregado na produção de novos concretos pode ser uma alternativa viável economicamente. Além disso, este processo permite a geração de empregos e aumenta a competitividade da economia. Deve-se enfatizar que a reciclagem

permite gerar valor a partir de um produto que, anteriormente, estava apenas associado a despesas (BUTTLER, 2003).

2.2 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS PROVENIENTES DE CONCRETO

As propriedades dos agregados influenciam de maneira significativa no desempenho do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a divisão mais adequada das propriedades dos agregados se dá de tal forma que resulta nos seguintes grupos: a) Características dependentes da porosidade: massa específica, absorção de água, resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade; b) Características dependentes das condições de exposição prévia e condicionante de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas; c) Características dependentes da composição química e mineralógica: resistência, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes.

Segundo Dal Molin (2005), um dos fatores limitantes para a utilização dos agregados de RCD é a característica dos mesmos. Entre estas características, no concreto reciclado, destacam-se a alta porosidade e diferenças de forma e textura superficial. Assim, o seu desempenho no concreto perante as deformações pode ser variado (LEITE, 2001).

Os agregados provenientes de concreto reciclado são compostos de agregados naturais e argamassa aderida e, portanto, as propriedades físicas deste material dependem tanto da qualidade quanto da quantidade desta argamassa (ETXEBERRIA et al., 2007). Além disso, a argamassa é bastante porosa e faz com que a porosidade dos ARC seja maior que a de agregados convencionais. Libachiya, Leelawat e Dhir (2000) encontraram em seu estudo valores de absorção entre 4,9 e 5,2% para agregados graúdos reciclados de concreto. Já Zega, Zaccardi e Maio (2010) encontraram valores entre 0,3 e 2,0% para agregados naturais e de 3,9 à 6,0% para agregados reciclados de concreto. Estes valores são superiores aos de agregados naturais, que segundo Neto (2005), estão em torno de 0,1 a 0,6% para o basalto e 0,1 a 0,8% para o granito. Werle (2010) encontrou valores de absorção, nos minutos iniciais (primeiros 10 minutos), para o agregado natural de origem basáltica, em torno de 0,7%, e nos agregados reciclados de concreto (50 MPa), valores em torno de 4,9%.

Além da porosidade, outra propriedade importante dos agregados reciclados, que se difere da dos agregados convencionais, é a massa específica, que normalmente é menor nos reciclados. O estudo de Zega, Zaccardi e Maio (2010) comprova esta afirmação, pois os mesmos encontraram valores entre 2,48 e 3,03 Kg/dm³ para agregados naturais, e entre 2,37 e 2,66 kg/dm³ para agregados reciclados de concreto.

Estas características podem afetar significativamente as propriedades do concreto. Segundo Levy (2001), é importante analisar separadamente os agregados a serem utilizados na produção dos concretos, pois as propriedades dos mesmos afetam as proporções de dosagem ou o comportamento do concreto fresco e/ou endurecido.

As propriedades do ARC são decorrentes das características do concreto que lhe deu origem e do tipo de beneficiamento adotado. O beneficiamento do ARC é um processo que abrange diferentes fases, tais como a forma de coleta, o transporte, a classificação do resíduo, a britagem, o peneiramento, dentre outras. Beneficiar o ARC implica no uso de um co-produto com menor heterogeneidade, o que valoriza esta alternativa. Segundo Leite (2001), a classificação do resíduo deve ser realizada o mais breve possível, preferencialmente durante o processo de demolição. Contudo, mesmo trabalhando-se apenas com ARC, o agregado ainda se constitui em um material heterogêneo. É possível ter, em um mesmo concreto, agregados provenientes de concretos de diferentes idades, que passaram por distintos processos de cura, além de diferentes composições. Katz (2003) britou concretos com um, três e vinte e oito dias de idade e concluiu que as propriedades, tais como absorção, densidade e massa específica dos agregados resultantes, foram bastante semelhantes, mas que, no entanto, as propriedades do agregado de concreto britado com três dias foram melhores que os demais.

2.3 CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

Uma alternativa que vem sendo estudada por pesquisadores para a reciclagem do agregado reciclado de concreto (ARC) é a utilização como matéria-prima na confecção de novos concretos, onde os materiais reciclados são utilizados como agregados graúdos e/ou miúdos. Segundo Banthia e Chan (2000), as diferenças entre as propriedades dos concretos reciclados e convencionais dependem de muitas variáveis, sendo que dentre elas pode-se destacar o teor de agregado natural substituído, as características dos agregados reciclados utilizados e a quantidade de contaminantes presentes no agregado.

Dentre as características dos agregados reciclados, o alto potencial de absorção de água é um dos parâmetros que o diferencia dos agregados naturais. Para Barra (1996), a quantidade de água que o material reciclado pode absorver é influenciada por diversos fatores, tais como as condições iniciais de umidade do agregado e o tempo de permanência de contato do material com a água (se o agregado entra em contato, primeiramente, somente com a água, ou com a pasta de cimento). Colaborando, Levy (1997) salienta que a elevada taxa de

absorção de água dos agregados reciclados também é influenciada pela quantidade de concreto antigo aderida às partículas.

Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) colocam que a mistura de concreto reciclado é semelhante ao procedimento para o concreto com agregado natural, apesar de serem necessárias correções no conteúdo de água, o que também pode ser feito por meio da utilização de aditivos, para obter-se uma trabalhabilidade adequada, mas as mudanças na relação água/cimento podem ser relativamente pequenas. Com relação ao processo de cura destes novos concretos, em termos de desempenho mecânico, o concreto produzido com ARC é afetado de maneira semelhante ao concreto convencional (FONSECA, BRITO e EVANGELISTA, 2011).

Segundo Coutinho (1997), outro fator que influencia significativamente na reciclagem de concretos é a forma das partículas, afetando principalmente a quantidade da água de amassamento necessária à mistura, a trabalhabilidade, a compacidade e o ângulo de atrito interno.

Em função destas diferenças que existem entre concretos convencionais e reciclados, algumas características importantes devem ser estudadas. Dentre elas estão a a trabalhabilidade, no estado fresco, e as propriedades mecânicas, no estado endurecido, dentre as quais destacam-se a resistência à compressão; a resistência à tração; e o módulo de elasticidade. Segundo Ávila e Giongo (2005), o concreto, como material para as estruturas de concreto armado, deve apresentar resistência mecânica satisfatória e aderência suficiente às barras das armaduras, além garantir a impermeabilidade da estrutura e proteção das armaduras. O mesmo autor ainda coloca que o comportamento mecânico do concreto é influenciado por fatores como a composição granulométrica do agregado, a resistência mecânica dos agregados, o tipo de cimento e sua quantidade em relação à água de amassamento, o tipo de solitação, a velocidade de carregamento e a idade do concreto, dentre outros.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), em concretos convencionais, os agregados naturais são geralmente densos e resistentes. Portanto, a porosidade da matriz é quem normalmente determina a característica de resistência deste material. Entretanto, nos concretos reciclados, os agregados provenientes de resíduos de concreto nem sempre são resistentes e, normalmente, possuem uma porosidade maior que a dos agregados convencionais. Portanto, quando se utiliza agregados reciclados para produção de concretos, esta influência se constitui em uma grande preocupação.

Segundo Leite (2001), a resistência à compressão é influenciada principalmente pela porosidade dos materiais que o compõem e pela porosidade da zona de transição. Além disso, a autora coloca que quando se utiliza agregados reciclados nas misturas de concreto, a relação água/cimento e o teor de agregado graúdo reciclado são os fatores que mais influenciam na determinação da resistência. Para Werle (2010), quanto ao teor de substituição de ARC, pode-se inferir que o ponto crítico situa-se entre teores de 50 e 75% de substituição, a partir do qual as propriedades mecânicas decaem rapidamente. Kou e Poon (2009) substituíram, em um mesmo concreto, agregados graúdos e miúdos, sendo que no primeiro foi substituído em 100 % e, no segundo, em teores de 0, 25, 50, 75 e 100%. A máxima resistência à compressão e à tração encontrada por eles ocorreu ao substituir entre 25 e 50% do agregado miúdo natural pelo reciclado.

Segundo Troian (2010), quanto menor a resistência à compressão do concreto que gerou o ARC, menor a resistência à compressão dos novos concretos produzidos com este material, enfatizando que isto depende da relação entre a resistência do agregado e a resistência da matriz. Etxeberria et al (2007) substituíram 100 % de AN por ARC e encontraram uma resistência à compressão de 20 a 25 % menor que as do concreto convencional aos 28 dias.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), com relação aos concretos convencionais, a razão entre a resistência à tração (f_t) e a resistência à compressão (f_c) situa-se entre a 0,11 e 0,07, quando as resistências à compressão variam entre 7 e 62 MPa. Leite (2001) afirma que esta relação, para o concreto reciclado, normalmente é maior que as relações geralmente verificadas em concretos convencionais. A mesma autora, ao trabalhar com concretos reciclados, observou que existe uma redução da relação f_t/f_c à medida que a resistência à compressão do concreto aumenta. Segundo Troian (2010), a resistência à compressão do ARC utilizada em novos concretos exerce uma influência muito fraca na resistência à tração por compressão diametral. Já com relação ao teor de substituição, segundo Werle (2010), o ponto crítico de substituição é determinado no teor de 50%, ou seja, inserindo até 50% de ARC, o concreto apresenta boas características de resistência à tração. Etxeberria et al (2007), por sua vez, expõem que a resistência à tração do concreto com ARC pode até ser maior que a do concreto convencional. Entretanto, Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) colocam que a resistência à tração de concretos convencionais são sempre maiores, mas a diferença não chega a ser 10% superior em relação a concretos produzidos com agregado reciclado de concreto. Libachiya, Leelawat e Dhir (2000) constataram, em seu estudo, que agregados

gráudos de concreto podem ser utilizados em larga escala, apresentando resultados de resistência à tração, compressão e módulo de elasticidade satisfatórios. Estes autores concluíram ainda, com base em seus estudos, que até 30% de substituição de agregados graudos naturais pelos reciclados, não exercem efeito sobre a resistência do concreto. Neste sentido, Topçu e Sengel (2004) também afirmam que é possível se obter concretos de qualidade substituindo até 30% dos agregados naturais pelos ARC. Entretanto também constataram que concretos com mais de 50% de substituição podem apresentar problemas de trabalhabilidade.

Com relação ao módulo de elasticidade de acordo com Ávila e Giongo (2005), o conhecimento a cerca desta propriedade é de suma importância, pois através dela são determinados os esforços solicitantes nas estruturas e são verificados os estados limite de serviço. Segundo Mehta e Monteiro (2008), muitas propriedades do concreto, como o módulo de elasticidade, estão diretamente ligadas à resistência. Os mesmos autores afirmam que comparando o concreto convencional com o reciclado, o segundo teria no mínimo dois terços da resistência à compressão e do módulo de elasticidade verificados no primeiro, bem como trabalhabilidade e durabilidade satisfatórias. Leite (2001) também afirma que os concretos reciclados apresentam-se mais deformáveis que os concretos convencionais. A partir do exposto, na sequência do presente trabalho se buscará estudar com maior atenção esta importante propriedade dos concretos.

2.4 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Para Mehta e Monteiro (2008), as características elásticas de qualquer material são uma medida de sua rigidez. Os autores colocam que, apesar de o concreto não apresentar um comportamento linear, é necessário uma estimativa do módulo de elasticidade (relação entre tensão aplicada e a deformação instantânea, dentro de um limite proporcional adotado), para que se possa, além de conhecer as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais, também calcular as tensões de projeto sob carga. O módulo de elasticidade do concreto é um dos parâmetros utilizados no cálculo estrutural e, sob o aspecto de projeto, é muito importante conhecer as propriedades elásticas do concreto para que se conheçam as deformações dos elementos estruturais que o concreto compõe.

Tem-se adotado diferentes nomenclaturas para esta propriedade do concreto, ora módulo de elasticidade (CEB-FIP Model Code 1990 – CEB, 1993), ora módulo de deformação (CEB, 1964; CEB, 1978; ABNT NBR 6118:2003). Segundo Santos, Gambale e Andrade (2006), o módulo de elasticidade baseia-se no comportamento linear das

deformações sob carregamento nos materiais, e isto somente ocorre para valores limitados de tensões aplicadas. Os mesmos autores explicam que a realidade se mostra diferente para tensões mais significativas (maiores do que 50% das tensões de ruptura, por exemplo), e que para o concreto, em particular, a falta de linearidade começa com valores menores de tensões. Por este motivo, prefere-se falar em “módulo de deformação” e não em “módulo de elasticidade”. Entretanto, na ABNT NBR 6118:2003 e na ABNT NBR 8522:2008, as duas terminologias são adotadas (SHEHATA, 2005). Neste trabalho, adotou-se o termo módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade avalia a resistência do material à deformação elástica e é conhecido também como módulo de Young, por referência ao cientista inglês Thomas Young (1773-1829), que estudou o comportamento elástico das barras. A equação que modela o comportamento elástico é conhecida como Lei de Hooke (Equação 1), pelos trabalhos de outro cientista inglês, Robert Hooke (1635-1703), que foi o primeiro a estabelecer experimentalmente a relação linear existente entre tensões e deformações.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

σ = tensão;
 E = constante de proporcionalidade;
 ε = extensão do componente ensaiado.

A constante “E” de proporcionalidade, conhecida como *módulo de elasticidade*, é o coeficiente angular da parte linear do diagrama “tensão X deformação”, sendo específico para cada material.

Para Souza (2006), pelo fato de o concreto ser um material que não obedece à lei de Hooke, tanto sob esforços de compressão como de tração, a determinação do módulo de elasticidade de concretos é mais complexa. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que as relações tensão-deformação do concreto são complexas, primeiro por ele não ser um material verdadeiramente elástico e, segundo, pelo fato de que nem as deformações nem as restrições são uniformes ao longo da peça de concreto. Portanto, as distribuições de tensão resultantes tendem a variar de ponto para ponto (BS 1881 Part 203, 1986, apud PRADO, 2006).

Segundo Equipe de Furnas, 1997 apud Santos, Gambale e Andrade (2006), mesmo que o concreto não seja um material verdadeiramente elástico e que o gráfico tensão-deformação para incrementos contínuos de carga, em geral, assumam a forma de uma linha

com suave curvatura, para fins práticos este é considerado linear, dentro dos limites das tensões normalmente adotadas. Para que essa linearidade seja respeitada, evitando-se assim microfissurações indesejadas no concreto, várias normas limitam a tensão máxima aplicada baseando-se em um percentual do valor da resistência final do concreto à compressão. A norma brasileira ABNT NBR 8522:2008, por exemplo, limita este valor em 30% da tensão de ruptura. Ressalta-se que a norma não faz considerações sobre o comportamento de concretos com agregados reciclados.

Para Mehta e Monteiro (2008), nem a deformação sob carga instantânea de um corpo-de-prova de concreto é diretamente proporcional à tensão aplicada, nem é totalmente recuperada após o descarregamento. Isto pode ser observado na Figura 2, conforme o estudo de Glucklich (1968).

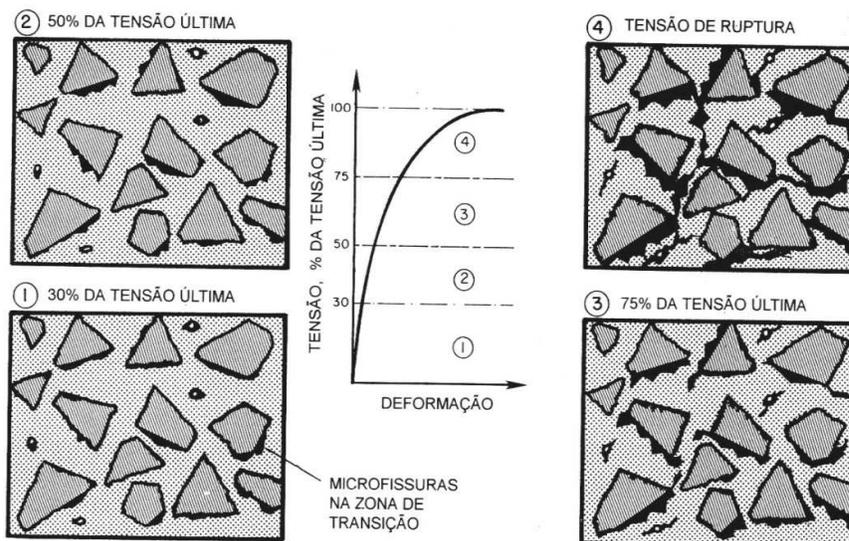


Figura 2 - Representação esquemática do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial.

Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

Antes de o concreto receber a aplicação de uma carga externa, já existem microfissuras na zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo. Segundo Mehta e Monteiro (2008), em concretos convencionais, estas microfissuras dependem, entre outros fatores, das características de exsudação, da cura do concreto e da resistência da zona de transição. Os autores ainda colocam que devido às diferenças de módulos de deformação, deformações diferenciais surgirão entre a matriz e o agregado graúdo, causando fissuras na zona de transição. No estágio 1 da Figura 2, pode-se observar que a curva tensão-deformação permanece linear. Isto ocorre porque abaixo de 30% da carga última, as fissuras na zona de

transição permanecem estáveis. Já com aplicação de carga de 50 a 60%, começam a formar-se fissuras na matriz (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Aproximações teóricas têm sido adotadas em normas técnicas de projeto estrutural no mundo todo, correlacionando o módulo de elasticidade do concreto à sua resistência característica à compressão. No entanto, não há nenhuma correlação direta em todos os casos entre estas duas propriedades (SANTOS, GAMBALE e ANDRADE, 2006). Bataggin (2008) demonstra na Figura 3 um exemplo de crescimento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto

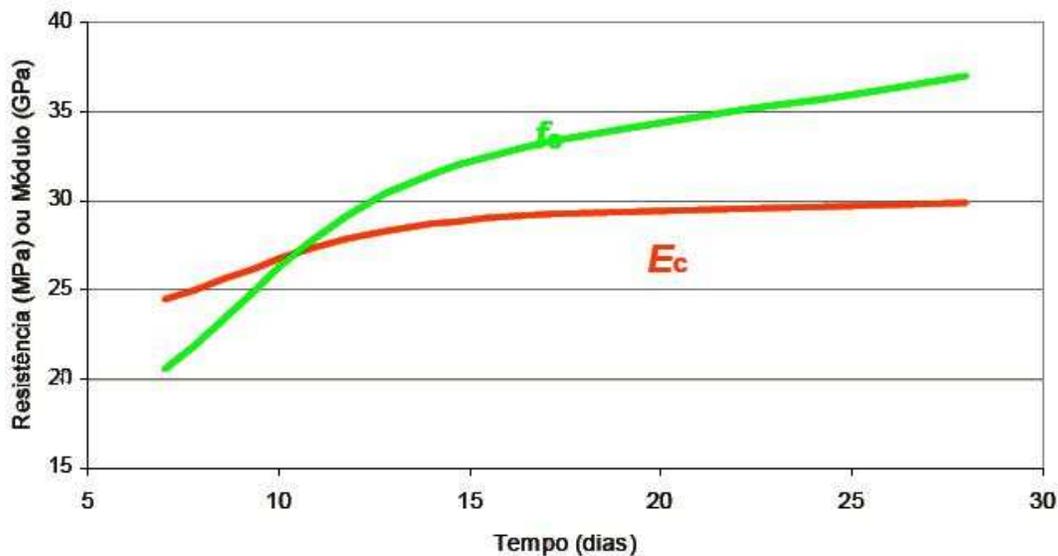


Figura 3 - Taxa de crescimento da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto.

Fonte: Bataggin (2008)

Muitos são os fatores que podem afetar o módulo de elasticidade. Segundo Vogt (2006), ele varia em função das matérias primas utilizadas e de sua resistência mecânica, diferentemente do que se observa nos metais. O mesmo autor explica que, no caso dos aços, independentemente da matéria-prima, a estrutura básica do cristal de ferro é sempre a mesma, pois independentemente da composição, é sempre o cristal cúbico de ferro que se sujeita às deformações elásticas. Já no caso do concreto, o cimento hidratado não tem sempre a mesma estrutura, pois é formado por cristais de diferentes espécies.

Em materiais heterogêneos, como é o caso do concreto, a massa específica, a fração volumétrica e o módulo de deformação dos principais componentes, além das características da zona de transição, determinam o comportamento elástico do compósito (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Segundo Shehata (2005), dentre os constituintes do material

estudado, os agregados, principalmente os grãos, têm uma grande influência no módulo. Barbosa e Geyer (2010) colocam que o tipo de agregado grão e o nível de resistência adotada na dosagem do concreto são fatores que definem o resultado do módulo de elasticidade do concreto. Na Figura 4 pode ser observado um diagrama com os principais fatores que afetam o módulo de elasticidade do concreto.

Alguns fatores que influenciam os valores de E_c			
Agregados	Pasta	Zona de transição	Execução da estrutura
Tipo	Resistência	Porosidade	A densamento
Módulo	Relação a/c	Composição	Cura
Proporção	Quantidade	Idade	Idade do carregamento
Quantidade	Idade	Resistência	Umidade
Forma	Ensaio		Temperatura
Textura	Corpos-de-prova		
	Aparelhagem		

Figura 4 - Parâmetros que influenciam o módulo de elasticidade.

Fonte: Battagin (2008)

2.4.1 Tipos de Módulos de Elasticidade

Mehta e Monteiro (2008) descrevem três tipos de módulos de elasticidade, sendo eles: o módulo de elasticidade dinâmico (MED); o módulo de elasticidade estático (MEE), que se divide em módulo tangente, módulo secante e módulo corda; e o módulo de deformação à flexão.

2.4.1.1 Módulo de elasticidade estático

Levy (2001) define Módulo de elasticidade, tangente à origem (conhecido também por módulo de elasticidade, estático e instantâneo, inicial) como o módulo de elasticidade, estático e instantâneo, cordal entre $0,5 \text{ MPa}$ e $0,3f_c$, (ou o módulo de elasticidade, estático e instantâneo, secante a $0,3f_c$). Este valor pode ser obtido pelo método de ensaio brasileiro descrito na NBR 8522 1 1984 da ABNT, para carregamento tipo III, que é praticamente equivalente ao valor obtido através do carregamento tipo I descrito no mesmo método que por sua vez é equivalente ao método de ensaio descrito na ISO 6784:82 e na Norma MERCOSUL 05:03-0124 de 1997.

Outro tipo de módulo definido pelo mesmo autor é o Módulo de elasticidade secante a qualquer porcentagem de f_c . O módulo estático e instantâneo, cordal entre $0,5 \text{ MPa}$ e $0,4f_c$, que é equivalente ao módulo de elasticidade, estático e instantâneo, secante a $0,4f_c$, sendo que esta é normalmente a tensão nas condições de serviço recomendadas nos códigos e normas de projeto de estruturas de concreto. Este valor pode ser obtido de várias formas, uma

delas descritas na NBR8522 1 1984 da ABNT, para carregamento tipo III, que é praticamente equivalente ao valor obtido através do carregamento tipo II descrito no mesmo método, que por sua vez é equivalente ao método de ensaio descrito na ASTM C 469;

A Figura 5 mostra a representação dos tipos de módulo de elasticidades. Santos, Gambale e Andrade (2006) acrescentam aos dois tipos de módulo de elasticidade citados anteriormente o módulo de elasticidade Tangente.

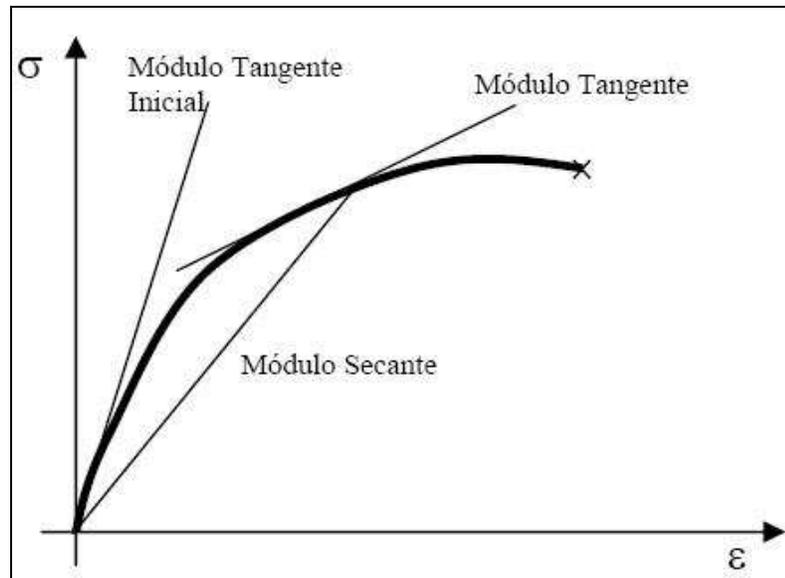


Figura 5 - Tipos de representação do módulo de elasticidade.

Fonte: Santos; Gambale e Andrade (2006)

Segundo Santos, Gambale e Andrade (2006), foi por extensão e comodidade que se passou a falar de módulo de elasticidade mesmo com diagramas curvos e com diagramas diferentes no carregamento e descarregamento e, então, surgiram os conceitos de “módulo de elasticidade secante”, onde se substitui o diagrama real por um diagrama linear fictício da origem até o ponto de carregamento previsto; e de “módulo de elasticidade tangente”, onde se substitui o diagrama real por uma reta paralela à tangente ao diagrama verdadeiro.

Embora a ABNT NBR 8522:2008 inclua procedimentos para a determinação dos módulos tangente inicial e secante para uma dada tensão, segundo a ABNT NBR 6118:2003 apenas o primeiro é o que deve ser especificado no projeto e controlado por meio de ensaios (SHEHATA, 2005).

Na Tabela 1 podem ser observados diferentes métodos padronizados para a determinação do módulo de elasticidade.

Tabela 1 – Módulo de elasticidade do concreto (GPa).

Norma	Denominação do módulo	$E_c = (\sigma_2 - \sigma_1)/(\epsilon_2 - \epsilon_1)$
RILEM CPC8 : 1975	Secante	$\sigma_1 = 0,5 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = f_c/3$ $\epsilon_1 = \text{deformação relativa a } \sigma_1$ $\epsilon_2 = \text{deformação relativa a } \sigma_2$
BS 1881 : 1983 (idem à ISO 6784)	Secante	$\sigma_1 = 0,5 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = f_c/3$ $\epsilon_1 = \text{deformação relativa a } \sigma_1$ $\epsilon_2 = \text{deformação relativa a } \sigma_2$
ASTM C469-02	Cordal	$\sigma_1 = \text{tensão relativa a } \epsilon_1 = 50 \times 10^{-6}$ $\sigma_2 = 0,4f_c$ $\epsilon_1 = 50 \times 10^{-6}$ $\epsilon_2 = \text{deformação relativa a } \sigma_2$
ABNT NBR 8522:2008	Tangente inicial	$\sigma_1 = 0,5 \text{ MPa}$ $\sigma_2 = 0,3 f_c$ $\epsilon_1 = \text{deformação relativa a } \sigma_1$ $\epsilon_2 = \text{deformação relativa a } \sigma_2$

Fonte: Shehata (2005)

Existem diferentes denominações de módulo, no entanto, para Shehata (2005), todas levam à determinação do módulo de elasticidade tangente inicial.

Para Mehta e Monteiro (2008), o módulo de elasticidade dinâmico (MED) é, geralmente, 20, 30 e 40 por cento maior do que o módulo de elasticidade estático (MEE) para concretos convencionais de alta, média e baixas resistências, respectivamente. Colaborando, Guimarães (2006) afirma que a relação entre o MEE e o MED varia de 0,5 a 0,8, dependendo da resistência do concreto e da heterogeneidade do mesmo. Magalhães et al (2010) também confirmam, com base em seus estudos, valores dentro destes limites para esta relação, já que eles encontraram resultados em torno de 0,5 aos 3 dias, 0,6 aos 7 dias e 0,7 aos 91 dias. A Tabela 2 apresenta os resultados de módulo de deformação estáticos e dinâmicos baseados na velocidade de propagação da onda segundo a BS 1881 Part 203 (1986), (BS 1881 Part 203, 1986, apud PRADO, 2006).

Tabela 2 – Estimativa dos módulos de deformação estático e dinâmico do concreto em função da velocidade ultra-sônica.

Velocidade ultra-sônica (m/s)	Módulo de deformação (GPa)	
	Dinâmico	Estático
3600	24	13
3800	26	15
4000	29	18
4200	32	22
4400	36	27
4600	42	34
4800	49	43
5000	58	52

Fonte: British Standards Institution (1986)

2.4.1.1 Módulo de elasticidade dinâmico

Mehta e Monteiro (2008) colocam que, para a análise de tensões de estruturas sujeitas a carga de impacto ou terremoto, é mais adequado utilizar o módulo de elasticidade dinâmico, por ser um método mais preciso.

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado através métodos não destrutivos. Shehata (2005) destaca dois métodos: um que relaciona o módulo com a frequência natural de vibração e outro que relaciona o módulo com a velocidade de propagação de ondas de ultra-som no corpo-de-prova. Segundo Pereira e Rodrigues (2010), as técnicas baseadas nas frequências naturais são mais utilizadas para a caracterização de materiais cerâmicos, frágeis e para caracterização em altas temperaturas, enquanto que a técnica de velocidade sônica é mais utilizada para a caracterização de metais e de concretos de construção civil. A Tabela 3 apresenta normas para ensaio de ultra-som e algumas diferenças entre seus procedimentos.

Tabela 3 – Comparação entre procedimentos de normas para ensaio de ultra-som.

Parâmetro	Normas			
	NM58/1996 ABNT NBR 8802:1994	RILEM NDT1/1972	BS1881: Part 203:1986	ASTM C597/1983
Frequência do ultra-som	Acima de 20KHz	20 a 200 KHz	20 KHz a 150 KHz*	10 KHz a 150 KHz
Superfície	Seca ao ar, limpa, e plana	Plana	Seca ao ar, limpa, e plana	Seca ao ar, limpa, e plana
Área de ensaio para verificar uniformidade de elementos estruturais grandes	1m ²	-	-	-
Distância entre os transdutores	Precisão de ±1%	Precisão de ±1%	Precisão de ±1%	Precisão de 0,5%
Medições de velocidade	Precisão de ±1%		Precisão de ±0,5%	Precisão de 0,5%

Fonte: Evangelista (2002)

Além dos diversos parâmetros destacados na Tabela 3, é importante salientar que segundo Aguilar et al (2006) a umidade da amostra afeta os resultados do módulo de elasticidade, sendo que em concretos testados úmidos esta propriedade é cerca de 15% maior que nos testados no estado seco. É importante observar que o inverso ocorre c/ a resistência á compressão, que é maior quando as amostras estão secas.

Segundo SOUZA (2006), não se poderia aplicar este método para o concreto de modo indiscriminado, por se tratar de um material não homogêneo. Porém, ele afirma que desde que o corpo-de-prova tenha dimensões compatíveis com o tamanho dos agregados, e que seja feito um número adequado de medidas de modo a minimizar a influência da

heterogeneidade do material, tem sido obtidos bons resultados. Por não se tratar de um método destrutivo, podem ser feitas inúmeras medidas no mesmo corpo-de-prova. Também se pode avaliar de forma eficaz a evolução da propriedade com o passar do tempo, e correlacioná-la com a resistência mecânica, sem que os efeitos impostos pela moldagem afetem os resultados.

No Brasil ainda não existe uma norma para determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Entretanto, a ABNT NBR 8802:1994 prescreve o método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultra-sônicos, através de um componente de concreto. Esta norma tem como principais aplicações a verificação da homogeneidade do concreto; a detecção de eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições; e o monitoramento de variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio (ataque químico), principalmente pela ação de sulfatos. Apesar desta normativa não ter como finalidade obter o módulo de elasticidade do material em estudo, ela auxilia na execução do ensaio.

2.4.1.2 Fatores que influenciam na velocidade ultra-sônica.

Considerando o fato de que o valor da velocidade de propagação da onda ultra-sônica exerce grande influência sobre o módulo de elasticidade dinâmico, é muito importante que se conheça e compreenda os fatores que podem interferir no referido valor. Trata-se de inúmeras características do material avaliado, dentre as quais se podem mencionar o tipo e a quantidade de agregado graúdo e cimento utilizados; o teor de umidade e a temperatura do concreto; e as condições da superfície do material (Evangelista, 2002; Prado, 2006).

De acordo com Popovics (2006), a velocidade de pulso verificada em concretos de mesmo traço e com o mesmo nível de resistência, porém fabricados com diferentes tipos de agregado graúdo, foi diferente. Aqueles confeccionados com cascalho arredondado apresentaram menor velocidade de pulso quando comparados com concretos confeccionados com pedra calcária ou com granito esmagado, que, por sua vez, apresentaram valores maiores e intermediários, respectivamente. Já Abo-Qudais (2005) verificou que o tamanho do agregado utilizado no concreto também se constitui em um fator determinante. Segundo o referido autor, quanto maior o tamanho do mesmo, maior a velocidade das ondas ultra-sônicas, o que também é afirmado por Evangelista (2002), ao expor que concretos com agregados de massa específica maior ou com maiores quantidades de agregado, apresentam maior velocidade. Na Figura 6, adaptada de Abo-Qudais (2005), pode-se observar a influência

do diâmetro do agregado graúdo sobre a velocidade ultra-sônica para concretos com diferentes tempos de cura. Nesta Figura a abscissa corresponde a quatro diferentes distribuições granulométricas segundo a ASTM.

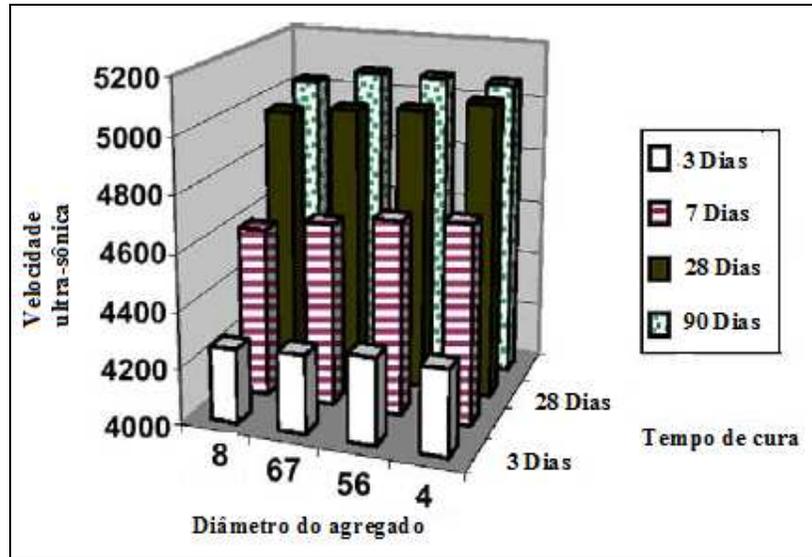


Figura 6 - Velocidade ultra-sônica em concretos dosados com diferentes diâmetros de agregados e diferentes tempos de cura

Fonte: Abo-Qudais (2005)

Nogueira e Willam (2001) apud Evangelista (2002) compararam cinco materiais com diferentes composições: concreto com agregado de diâmetro máximo de 12,5, de 9,5 e de 4,75 mm; argamassa; e pasta de cimento, sendo que a relação água/cimento foi de 0,55 para os concretos e de 0,50 para a argamassa e a pasta de cimento. O maior valor de velocidade de propagação da onda foi obtido no concreto com agregados de diâmetro máximo de 12,5 mm, reforçando a afirmação de que, quanto maior o agregado graúdo utilizado, maior a velocidade de propagação da onda ultra-sônica. Segundo muitos autores, o tipo e a quantidade de cimento presentes nos materiais, também exercem influência significativa do sobre a velocidade ultra-sônica (PRADO, 2005).

Geralmente, o valor da velocidade do som é maior em materiais sólidos do que em líquidos e, nestes, maiores do que nos gases. Da mesma maneira, a umidade do material influencia a velocidade de propagação da onda ultra-sônica e, neste contexto, Popovics (2005) afirma que a velocidade em concreto saturado é maior que em concreto seco. Quantificando isso, a C597 (ASTM, 2009) coloca que a velocidade de pulso em concreto saturado pode ser até 5% superior ao do concreto seco. Prado (2005) afirma que em concretos úmidos a velocidade de propagação da onda pode apresentar valores até 5% superiores que em

concretos secos. Colaborando, Chung e Law (1983) afirmam que concretos saturados resultam em uma velocidade de propagação cerca de 2% superior quando comparados a concretos secos. Além disso, Popovics (2005) ainda coloca que não é apenas o teor de água que influencia na velocidade de propagação da onda, mas também a distribuição do líquido no concreto.

Ohdaira e Masuzawa (2000) realizaram um estudo para investigar a influência do teor de água na propagação de ondas ultra-sônicas. Para tanto, a relação água/cimento e a porcentagem de agregado miúdo foram mantidas constantes e constatou-se que a velocidade de propagação da onda diminui linearmente com a diminuição do teor de água, como pode ser observado na Figura 7. Eles atribuem este comportamento ao fato de que, quando o teor de água é suficiente para encher grande parte dos vazios, a velocidade de propagação é mais rápida. No entanto, esta velocidade torna-se mais lenta após a evaporação da água do concreto.

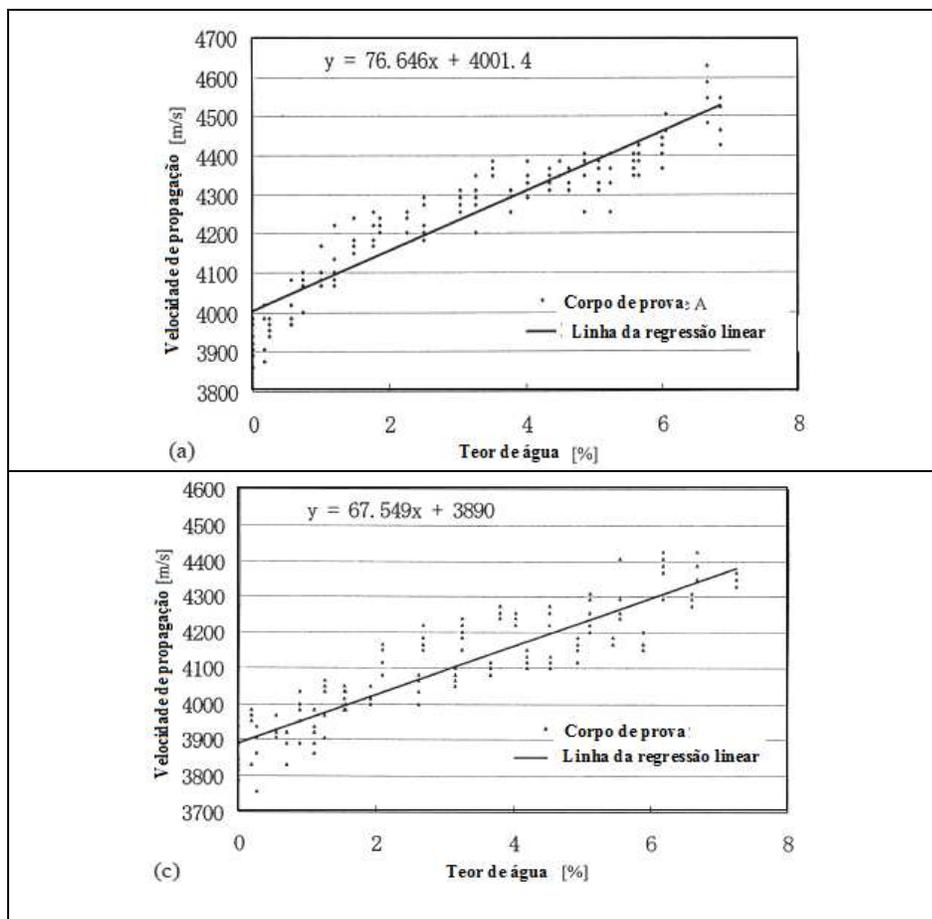


Figura 7 - Relação entre a velocidade de propagação de pulsos ultra-sônicos e teor de água .

Fonte : Ohdaira e Masuzawa (2000)

A temperatura do concreto, por sua vez, também é um fator a ser considerado na determinação da velocidade da onda ultra-sônica. De acordo com a RILEM NDT 1 (1972) apud Evangelista (2002), caso esta apresente-se superior a 30°C ou inferior a 5°C, pode ocorrer alteração no valor verificado. Evangelista (2002) afirma que temperaturas entre 40°C e 60°C acarretam em redução da velocidade, em função da microfissuração interna do concreto. Abbasi & Al-Tayyib (1990), por sua vez, estudaram a influência da temperatura durante a preparação do concreto e concluíram que a velocidade de pulso diminui com o aumento da temperatura da mistura.

Evangelista (2002) afirma ainda que, conforme as normas técnicas internacionais, a superfície do concreto em análise deve ser lisa, visando garantir o perfeito acoplamento dos transdutores ao mesmo. Além disso, o autor afirma que deve-se evitar as superfícies que receberam acabamento, pois o concreto presente nesta superfície pode não ser representativo do material como um todo

2.4.1.3 Estimativa do módulo de elasticidade

Além dos tipos de módulo de elasticidade e os métodos de ensaio para obtê-los, na literatura nacional e internacional encontram-se diversas fórmulas para a estimativa do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão. Segundo Santos, Gambele e Anbrade (2006), os valores dos módulos de deformação usados nos cálculos de projetos de concreto são normalmente estimados a partir de expressões empíricas que pressupõem como principal dependente do módulo de deformação a resistência à compressão e densidade do concreto. Na Tabela 4 podem ser observadas algumas destas fórmulas.

Tabela 4 – Modelos Empíricos de predição do módulo de elasticidade

Norma	Identificação	Equação
ABNT NBR 6118:03	Norma Brasileira	$E_{ct} = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$
FIP/CEB – MC 90	Comitê Europeu do Concreto	Equação (a): $E_c = 21500 \cdot \sqrt[3]{\frac{f_{ck} + 8}{10}}$ ou Equação (b): $E_c = 21500 \cdot \sqrt[3]{\frac{f_{cj}}{10}}$
ACI 318 (1992)	Instituto Americano do Concreto	Equação (a): $E_c = \rho^{1.5} \cdot 33 \cdot \sqrt{f_c}$ ou Equação (b): $E_c = 5700 \cdot \sqrt{f_c}$
JSCE (1991)	Sociedade Japonesa de Engenharia Civil	$E_e = \psi(t) \cdot 1500 \cdot \sqrt{10 \cdot f_c(t)}$

Fonte: Santos, Gambele e Anbrade (2006)

Na norma FIP/CEB – MC 90 a equação “a” é para concretos na idade de 28 dias e a equação “b” é para concretos para idades diferentes de 28 dias. Com relação a ACI 318

(1992) a equação “a” é utilizada quando a massa específica do concreto (ρ) está entre 90lb/ft³ (1440kg/m³) e 155 lb/ft³ (2480kg/m³) e a equação “b” é utilizada para concretos normais com massa específica de um concreto convencional.

Cabe salientar que segundo Silva (1997) os resultados encontrados, usando essas expressões conduzem, algumas vezes, a valores pouco precisos, o autor comenta que os valores vão ser tão próximos do real quanto mais eles se aproximarem dos materiais, do tipo de mistura, da composição do concreto, das condições de ensaio, daqueles utilizados nos estudos experimentais (SILVA, 1997).

Gagliardo, Vidal e Gagliardo (2010) observaram em seu estudo (Tabela 5) que o módulo de elasticidade determinado nos ensaios utilizando a ABNT NBR 8522:2008) são consideravelmente diferente dos estimados na ABNT NBR 6118:2003. Marchi et al (2010) colocam que esta propriedade é fortemente influenciada pelo tipo de agregado e pelo teor de argamassa e que este importante parâmetro normalmente não é levado em consideração pelas equações propostas pelas normas para estimar essa propriedade. Os mesmos autores colocam que dependendo do tipo de agregado gráudo utilizado na produção do concreto, os valores de módulo de deformação podem variar muito, ficando evidente a importância da consideração desta variável, sob a pena se subestimar ou superestimar a propriedade no cálculo das estruturas.

Tabela 5 – Comparação entre módulo de elasticidade experimental e estimado.

Agregado Graúdo	Teor de argamassa (%)	Módulo experimental (GPa)	Módulo estimado ABNT NBR 6118:2004 (GPa)
Basalto	47	43,9	33,13
	51	39,3	33,13
	55	38,4	33,13
	59	39,4	33,13
Gnaisse	47	25,3	33,13
	51	32,1	33,13
	55	30,5	33,13
	59	29,5	33,13

Fonte: Gagliardo, Vidal e Gagliardo (2010)

Segundo Borin (2010), quando se utiliza o modelo empírico proposto pela norma brasileira (ABNT NBR 6118:2003), existe sempre uma probabilidade do concreto não atender ao valor especificado em projeto, podendo dar margem a distorções localizadas.

2.4.2 Módulo de elasticidade de concretos com ARC

Tendo em vista que o módulo de elasticidade de concretos é dependente do teor de agregado gráudo e, por sua vez, do teor de argamassa, ao substituir agregados

convencionais por agregados reciclados ou de menor módulo de elasticidade, é necessário proceder-se investigações acerca desta propriedade.

Ao conduzir experimentos neste sentido, Domingo et al. (2010) concluíram que o percentual de substituição dos agregados reciclados de concreto pelos convencionais influencia nas propriedades elásticas do mesmo. Neste contexto, pelo fato de ser uma das propriedades mecânicas mais importantes do concreto, outros pesquisadores, como Topçu e Gungan (1995); Katz (2003); Khatib (2005); Etxeberria et al (2007); Brito e Alves (2010); Fonseca, Brito e Evangelista (2011); e Xião, Li e Zhang (2005) também têm estudado os efeitos dos agregados reciclados de concreto no módulo de elasticidade deste material.

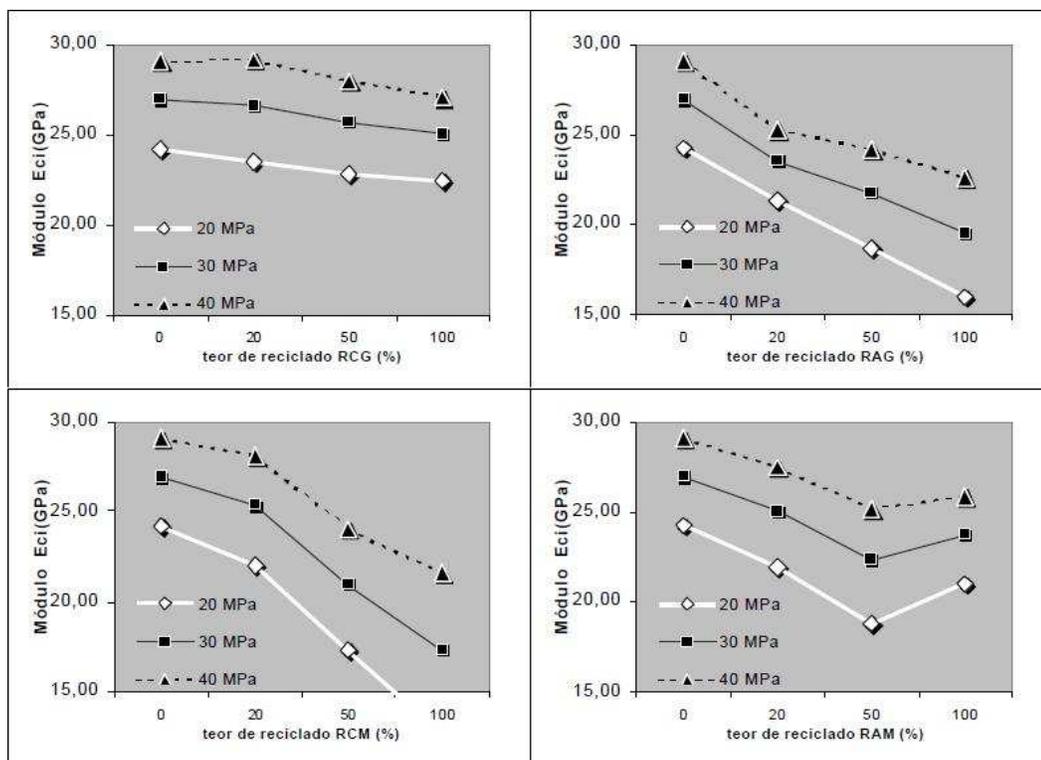
A diminuição do módulo de elasticidade, ao empregar agregado reciclado, chega a valores bastante significativos, conforme estudo conduzido por Schulz e Hendricks (1992), cujos resultados indicam que o módulo de elasticidade de concretos com agregado reciclado pode apresentar valores correspondentes a 43 % a 50 % do módulo de elasticidade de concreto convencional. Valores similares foram encontrados por Xião, Li e Zhan (2005), cujas conclusões apontam que quanto maior o teor de agregado reciclado, menor o valor do módulo de elasticidade e que, substituindo 100% do AN pelo ARC, esta propriedade é reduzida em 45% enquanto que Topçu e Gunçan (1995) encontraram a redução de 80%. Já para Katz (2003), este percentual ficou entre 37% e 51%, sendo que o mesmo britou o concreto em diferentes dias de idade (um, três e vinte e oito dias), produzindo o concreto com cimento Portland branco e cimento Portland comum, e os resultados do estudo podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Módulo de elasticidade do concreto (GPa).

Tempo	Cimento Portland	
	Comum	Branco
Referência	22,7	23,1
1 dia	14,2	11,4
3 dias	13,3	13,7
28 dias	11,3	11,5

Fonte: Adaptado de Katz (2003).

Levy (2001), como resultado de seu estudo, demonstra graficamente (Figura 8) uma tendência decrescente do valor do módulo de elasticidade em função do acréscimo do teor de agregados graúdos reciclados.



Onde: RCG - agregados reciclados de concreto graúdos; RAG - agregados reciclados de alvenaria graúdos; RCM - agregados reciclados de concreto miúdos; RAM - agregados reciclados de alvenaria miúdos.

Figura 8 - Módulo de elasticidade de diferentes classes de concreto em função do teor do agregado reciclado

Fonte: Levy (2001)

Khatib (2005) substituiu os agregados miúdos pelos reciclados de concreto, chegando a conclusões coerentes com as apresentadas por Levy (2001), conforme observado na Tabela 7. O módulo de elasticidade diminui com o aumento do percentual de substituição de agregado.

Tabela 7 – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto.

Mistura	Identificação	Idade			
		1 dia	7 dias	28 dias	90 dias
M1	Controle	36,5	46,0	48,1	48,3
M2	CC25	30,0	38,5	44,7	44,7
M3	CC50	29,2	37,0	42,5	43,4
M4	CC75	27,9	36,2	42,3	42,5
M5	CC100	27,2	31,4	39,1	40,4
M6	CB25	34,1	43,9	45,7	47,2
M7	CB50	30,5	40,4	45,3	45,9
M8	CB75	28,3	36,7	40,4	43,8
M9	CB100	25,9	36,2	38,1	43,5

CC = agregado de concreto; CB = agregado de tijolo; 25, 50, 75, 100 = taxa de substituição (%)

Fonte: Khatib (2004)

Tanto Brito e Alves (2010) quanto Fonseca, Brito e Evangelista (2011) observaram, em suas pesquisas, que há uma clara tendência para diminuição do módulo de

elasticidade com o aumento da taxa de substituição dos agregados convencionais pelos reciclados. Entretanto, Evangelista (2007) afirma que a substituição de até 30% de agregados convencionais pelos reciclados de concreto não compromete as propriedades mecânicas do concreto.

Fonseca, Brito e Evangelista (2011) estudaram o efeito de diferentes processos de cura no módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes teores de substituição (20%, 50% e 100%) de AN por agregado graúdo de concreto reciclado. Eles concluíram que, em condições de cura em laboratório (LCC), foram encontrados os valores mais baixos de módulo. As outras condições de cura estudadas que foram cura em ambiente externo (OEC), cura na câmara úmida (CMI) e cura imersa em água (WIC) apresentaram valores maiores, pois estas apresentam um ambiente mais úmido e conseqüentemente mais favorável para a cura dos concretos. A Figura 9 mostra graficamente estes resultados.

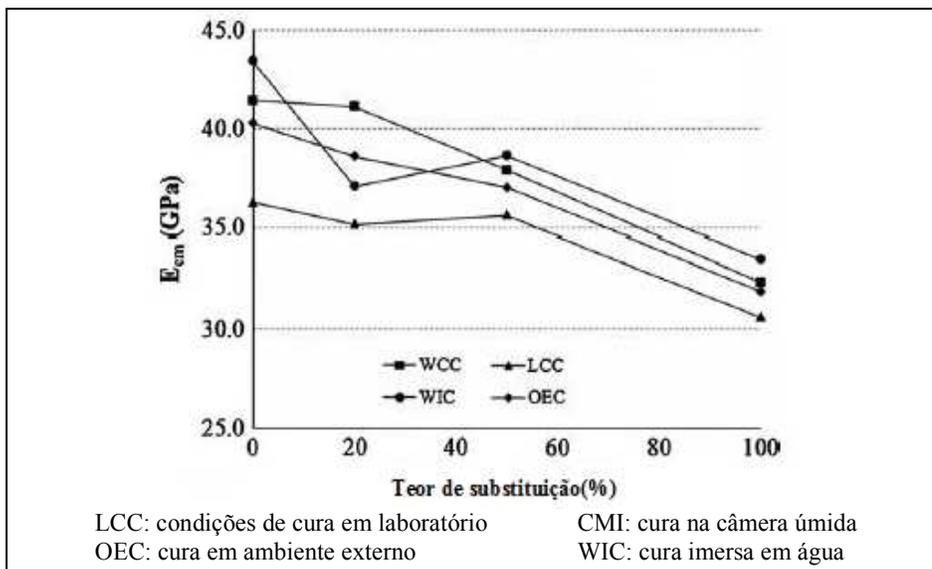


Figura 9 - Módulo de elasticidade com relação a diferentes teores de substituição de AN por ARC em diferentes condições de cura

Fonte: Fonseca, Brito e Evangelista (2011)

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados na pesquisa e a metodologia desenvolvida para realizar os estudos de verificação do módulo de elasticidade dinâmico de concretos produzidos com a utilização agregados reciclados de concreto.

Este trabalho se enquadra em uma linha de pesquisa do grupo de materiais e reciclagem do PPGEC, onde foi elaborado um amplo projeto de pesquisa sobre o uso de agregados reciclados a partir de resíduos da construção civil. Neste projeto, a confecção e caracterização dos agregados reciclados de concreto (ARC) e a moldagem dos concretos, foram realizados para o desenvolvimento das dissertações de Werle (2010), Troian (2010) e Gonçalves (2011), intituladas *Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação*, *Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração íons cloreto* e *Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos*, respectivamente. Portanto, as informações a respeito dos materiais utilizados na confecção dos corpos-de-prova foram extraídas das referidas dissertações. Dando seqüência aos trabalhos das pesquisadoras, foram realizados, na pesquisa desta dissertação, ensaios para avaliar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto.

Foram estudados dois grupos de concreto com ARC. Num primeiro estudo determinou-se a influência da substituição do agregado graúdo por agregados reciclados, provenientes de dois tipos de concreto, em matrizes com diferentes níveis de resistência. Estes concretos produzidos por Gonçalves (2011) foram chamados de “Grupo A”, onde foram desenvolvidos três diferentes traços de concreto, com a substituição de 50% do agregado graúdo por dois tipos de agregados reciclados obtidos a partir de resíduos de concreto gerados por uma indústria de pré-fabricados, localizada no município de Porto Alegre/RS. Um deles é um resíduo de concreto plástico, com cura convencional ao ar (RCC), e o outro é o resíduo de concreto seco (com pequeno teor de umidade), com cura térmica à vapor (RCT). Os traços empregados nas misturas do Grupo A podem ser visualizadas nos apêndices.

Num segundo estudo, foi determinada a influência de diferentes teores de substituição de agregado natural por agregado reciclado de concretos com diferentes níveis de resistência, em uma única nova matriz de concreto. Os corpos-de-prova confeccionados por Werle (2010) e Troian (2010), utilizados neste trabalho, serão denominados de “Grupo B”.

Estes foram confeccionados com ARC produzidos em laboratório, sendo que os mesmos apresentavam dois diferentes níveis de resistência: 18 MPa (a/c de 0,85) e 50 MPa (a/c 0,43). Estes agregados foram inseridos em uma nova matriz de concreto (no traço 1: 2,63: 3,77, com relação a/c = 0,64, que no concreto de referência corresponde a uma resistência de 32 MPa), substituindo o agregado natural pelo ARC em diferentes teores (25, 50, 75 e 100%).

Todos os corpos-de-prova que fazem parte deste programa experimental foram moldados no laboratório de materiais de construção civil da UNISINOS, e permaneceram em cura úmida até o momento dos ensaios de módulo de elasticidade.

3.1 MATERIAIS

Por se tratar de uma pesquisa que ocorre em seqüência a outras e que vem a complementar um trabalho mais amplo, os materiais empregados já foram caracterizados pelos autores citados anteriormente e, por este motivo, os mesmos serão descritos de forma sucinta, sendo que maiores informações podem ser encontradas nas referidas dissertações.

3.1.1 Cimento e pozolanas

O cimento empregado no programa experimental (Grupo A e B) foi o cimento Portland, de alta resistência inicial CP-V-ARI, por se tratar de um material que possui um rápido grau de hidratação do concreto, bem como por não conter adições pozolânicas. As propriedades do cimento foram fornecidas pelo fabricante e podem ser visualizadas nos apêndices.

Nos concretos do grupo A ainda foi empregada adição de cinza volante (15%).

3.1.2 Água

Para os dois Grupos a água utilizada para produzir o concreto foi proveniente da rede pública de abastecimento do respectivo município.

3.1.3 Aditivo

O aditivo utilizado nas dosagens é um superplastificante da marca MC Power Flow 1059 - Mc Bauchemier, sendo fornecido pela indústria de pré-fabricado. Foi empregado aditivo apenas para confecção dos concretos do Grupo A.

3.1.4 Agregado Graúdo Natural (AN)

O agregado graúdo natural utilizado tanto para o Grupo A quanto para o Grupo B é de origem basáltica, proveniente do Rio Grande do Sul. A granulometria do agregado

graúdo natural, definida de acordo com os padrões da ABNT NM 248:2003 e sua composição podem ser observadas nos apêndices.

3.1.5 Agregado Miúdo Natural

Os agregados miúdos utilizados nos Grupos A e B são de origem quartzosa. De acordo com os resultados obtidos nos ensaios, os agregados miúdos pertencem à zona utilizável, conforme ABNT NM 248:2003. A caracterização granulométrica deste material pode ser observada nos apêndices.

3.1.6 Agregado Reciclado de Concreto (ARC)

Com relação aos agregados reciclados produzidos para o *Grupo A*, os resíduos utilizados no programa experimental são provenientes de concretos submetidos à cura convencional (RCC), ao ar, utilizado para a fabricação de lajes alveolares, e de concretos submetidos a cura térmica (RCT), a vapor de água, utilizados para a fabricação de estacas.

Os concretos que originaram os ARC do Grupo A foram obtidos a partir de corpos-de-prova moldados e curados da mesma forma e simultaneamente à produção dos elementos pré-fabricados que geram os resíduos elencados para o estudo. Gonçalves (2011) optou por esta forma de obtenção do concreto residual em função de dificuldades para o desmonte dos fragmentos de peças pré-fabricadas, que originariam os resíduos e cujas dimensões eram incompatíveis com a boca de alimentação do britador disponível naquele momento. Os concretos residuais apresentaram resistência à compressão aos 28 dias de 45,7 MPa para o RCT e de 40,0 MPa para o RCC. Após 28 dias, o resíduo foi britado e peneirado em agitador mecânico para separação da fração graúda (fração de interesse). Posteriormente, os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos. Os resultados podem ser observados nos apêndices.

Os concretos empregados para a obtenção dos agregados reciclados utilizados no *Grupo B* foram produzidos em laboratório, sendo que os insumos utilizados neste processo foram os mesmos do concreto da nova matriz onde foram inseridos os ARC. O método de dosagem adotado para a produção do ARC foi baseado em Helene e Terzian (1993). Para a dosagem do concreto reciclado se estabeleceu um teor de argamassa α de 49%. A quantidade de água foi ajustada em função de um abatimento estipulado em 100 ± 20 cm. As curvas de Abrams, Molinari e Lyse, dos concretos empregados como resíduos podem ser visualizadas nos apêndices. Para obter-se o volume de ARC necessário ao programa experimental, foram executadas oito betonadas de 55 Kg cada uma, para cada traço: a/c 0,85 (pobre) e a/c 0,43

(rico), moldados corpos-de-prova de dimensões de 10 × 20 cm. Obteve-se concretos de 18 e 50 MPa, após 63 dias de cura submersa.

Posteriormente, os corpos-de-prova foram britados em um britador de mandíbulas e, em seguida, permaneceram por 7 dias em estufa a 60°C até a estabilização da massa. Após a secagem, o ARC passou por um processo de peneiramento em agitador de peneiras, durante 15 minutos. Definiu-se que para a confecção dos novos concretos, seria utilizada somente a fração graúda do ARC gerado. Depois de peneirado, o material foi armazenado em tonéis plásticos, evitando qualquer tipo de contaminação.

3.2 PRODUÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os concretos de referência e com incorporação de ARC foram moldados em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20 cm, de acordo com a norma ABNT NBR 5738:2003. Adotou-se o procedimento de cura submersa, que foi realizada em tanques com solução saturada de água e cal. A cura submersa segue o procedimento na norma ABNT NBR 5738:2003. Os ensaios de módulo de elasticidade foram feitos no caso do Grupo A, após aproximadamente dois anos de permanência na Câmara úmida e no caso do Grupo B, após cerca de 1 ano de permanência no mesmo local. Em função da idade, procedeu-se uma nova determinação da resistência à compressão.

Os corpos-de-prova do Grupo A foram fabricados no decorrer do primeiro semestre de 2010 e encontravam-se armazenados no interior da câmara úmida. Empregou-se um total de 29 corpos-de-prova, cuja identificação se deu da seguinte forma: traço pobre, sem resíduo (TP); traço intermediário, sem resíduo (TI); traço rico, sem resíduo (TR); traço pobre com teor de substituição de 50% de RCC (TP-R1); traço intermediário com teor de substituição de 50% de RCC (TI-R1); traço rico com teor de substituição de 50% de RCC (TR-R1); traço pobre com teor de substituição de 50% de RCT (TP-R2); traço intermediário com teor de substituição de 50% de RCT (TI-R2); e traço rico com teor de substituição de 50% de RCT (TR-R2), conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Corpos de prova do grupo A.

Tipo de resíduo	Pobre	Intermediário	Rico
REF (sem resíduo)	TP (4)*	TI(2)	TR(3)
RCC	TP-R1(2)	TI-R1(3)	TR-R1(2)
RCT	TP-R2(3)	TI-R2 (7)	TR-R2(3)

(n) corresponde ao número de exemplares disponíveis para a pesquisa

Os corpos-de-prova referentes ao Grupo B foram moldados durante o primeiro semestre de 2009 e encontravam-se armazenados no interior da câmara úmida. Empregou-se um total de 60 corpos-de-prova, de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 – Corpos de prova do Grupo B

Tipo de resíduo	Teor de ARC (%)	Número de corpos-de-prova
ARC 18 MPa (a/c 0,85)	25	8
	50	8
	75	6
	100	9
ARC 50 MPa (a/c 0,43)	25	6
	50	8
	75	6
	100	9

3.3 MÉTODOS

Neste item são apresentados os métodos empregados os ensaios de módulo de elasticidade e resistência à compressão, assim como para o planejamento e análise estatística dos experimentos.

3.3.1 Planejamento estatístico

A área da estatística envolve a coleta, a apresentação, a análise e o uso dos dados para resolver problemas e planejar produtos e processos (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). Logo, os métodos estatísticos são utilizados para ajudar a entender a variabilidade de um sistema ou fenômeno. Para o mesmo autor, em um experimento planejado, o pesquisador faz variações intencionais nas variáveis controláveis, observa os efeitos e, então, faz inferência sobre as variáveis que são responsáveis pelas mudanças observadas nos resultados.

Neste estudo foi realizado um planejamento experimental, onde as combinações dos níveis dos fatores serão investigadas, conforme o objetivo do estudo.

3.3.1.1 Variáveis independentes

As variáveis independentes investigadas, e seus níveis de controle, foram:

- Teor de agregado reciclado, com percentual de substituição de agregados naturais por agregado de concreto reciclado empregou níveis fixos de substituição de 0 e 50% para o Grupo A; e de 0, 25, 50, 75 e 100%, para o Grupo B;

- Teor de umidade do concreto (para o módulo de elasticidade dinâmico) será de 0 e 100% (ou seco e saturado);
- Tipo de agregado reciclado utilizado para o Grupo A igual a REF, RCC e RCT; e para o Grupo B "18 MPa" e "50 MPa".

3.3.1.2 Variáveis dependentes

As variáveis estudadas, diretamente influenciadas por alguma variável independente, foram:

- Módulo de elasticidade dinâmico;
- Resistência à compressão axial.

3.3.1.3 Tratamento estatístico

Com base nos resultados obtidos foi realizado o tratamento estatístico. Neste, primeiramente, foi realizada a estatística descritiva envolvendo as medidas de posição (médias) e variabilidade (desvio padrão e coeficiente de variação).

Na sequência foram aplicados testes (teste t de Student, ANOVA, teste Tukey) para verificar a diferença entre as médias em relação ao módulo de elasticidade bem como à resistência à compressão axial, em função das variáveis independentes estabelecidas. Também se utilizou a ferramenta de correlação e regressão entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, verificando a relação entre as mesmas.

3.3.2 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

Após o levantamento e preparação dos corpos-de-prova, realizou-se o ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico (MED), baseando-se na C597 (ASTM, 2009).

O ensaio para determinação da velocidade de propagação da onda ultra-sônica foi realizado com o equipamento PUNDIT (aparelho de ultra-som portátil digital), que possui frequência de 54 kHz, em todos os corpos-de-prova, tanto para a condição de umidade saturada quanto para a seca. Como todos os corpos-de-prova estavam armazenados na câmara úmida do laboratório de materiais, primeiramente se executou o ensaio com os mesmos saturados.

Os corpos-de-prova foram retirados de dentro da câmara úmida e armazenados dentro de um recipiente com água para proceder a limpeza do material e, também, para

garantir que os mesmos não perdessem umidade durante o transporte até uma sala climatizada para realização do ensaio na condição saturada, onde a temperatura foi mantida em $(22\pm 2)^{\circ}\text{C}$.

Os corpos-de-prova foram retirados da água e colocados verticalmente sobre panos úmidos por 2 minutos para que escoasse o excesso de água da superfície. Posteriormente, aplicou-se uma camada de vaselina nas superfícies planas do emissor e do receptor do equipamento, permitindo o acoplamento dos mesmos no corpo-de-prova. Registrou-se, então, a velocidade de propagação da onda, em μs , em cada corpo-de-prova. O ensaio foi realizado com o equipamento posicionado no modo de transmissão direta, conforme pode ser observado na Figura 10, e o mesmo foi calibrado a cada 3 exemplares ensaiados.



Figura 10 - Ensaio para verificação da velocidade da onda ultra-sônica.

Concluído este ensaio, os corpos-de-prova foram armazenados em uma estufa a 60°C , onde permaneceram até atingirem constância de massa. Então, foi repetido o mesmo procedimento para determinação da velocidade de propagação da onda com estes corpos-de-prova. Como os mesmos apresentavam uma temperatura elevada logo após a retirada da estufa, que poderia alterar a viscosidade da vaselina e impedir o acoplamento dos sensores do equipamento, adotou-se o seguinte procedimento: os corpos-de-prova eram retirados da estufa e imediatamente pesados e armazenados dentro de uma câmara de sazonalamento por 30 minutos. Após este tempo eram pesados novamente para se certificar que estes permaneciam completamente secos e, então, se realizava o ensaio descrito.

Outra informação necessária para calcular o módulo de elasticidade dinâmico, conforme a ASTM C597/2009, é a densidade do corpo de prova. Para se obter esta informação, calculou-se o volume do corpo-de-prova e o peso seco do mesmo. Outro dado que compõe a equação para se determinar o MED é o coeficiente de Poisson. Em função da impossibilidade de se obter este valor experimentalmente, esta informação foi estabelecida com base na literatura, buscou-se trabalhos que possuíssem concretos com o mesmo tipo de resíduo. Com base nos estudos de Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) adotou-se o valor de 0,20. De posse dessas informações, foi possível calcular o módulo de elasticidade dinâmico, por meio da Equação 2

$$Ed = \rho V^2 \cdot \frac{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Ed = módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

ρ = massa específica (kg/m³);

V = velocidade (km/s);

μ = coeficiente de Poisson.

3.3.3 Determinação da resistência à compressão

A resistência à compressão dos corpos-de-prova, na idade dos ensaios de módulo de elasticidade, foi determinada com o intuito de verificar eventuais correlações entre estas variáveis.

Em função da pequena quantidade de exemplares disponíveis para cada tipo de concreto, e considerando que o objetivo inicial deste trabalho era determinar também o módulo de elasticidade estático segundo o plano de carga da ABNT NBR 8522:2008, utilizou-se este plano de carregamento especificado pela norma para a determinação da resistência à compressão dos corpos-de-prova na idade de execução do programa experimental. Infelizmente, devido a problemas detectados no equipamento que mede a deformação, ao longo dos ensaios, não foi possível concluir esta análise. Como vários exemplares já haviam sido ensaiados desta forma, optou-se por continuar efetuado o ensaio com os ciclos de carregamento e descarregamento especificados na norma para se manter um padrão. Foi realizado um estudo complementar procurando verificar as diferenças na determinação da resistência à compressão axial segundo o método especificado pela ABNT NBR 5739:2003 e o método especificado pela ABNT NBR 8522:2008, onde se verificou que a diferença é inferior a 1,8 %. Todos os ensaios foram realizados com os corpos-de-prova saturados.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios obtidos no programa experimental. Os dados foram tratados estatisticamente, sendo que as ferramentas utilizadas para a análise foram as medidas descritivas, envolvendo as de posição e de variabilidade, teste t de Student, ANOVA, teste Tukey, análise de regressão e correlação entre as variáveis do estudo. O Grupo A e Grupo B foram analisados separadamente por se tratarem de concretos com variáveis diferentes.

4.1 RESULTADOS DO GRUPO A

O Grupo A é composto pelos corpos-de-prova produzidos com 50% de substituição de agregados provenientes de dois diferentes tipos de resíduos de uma indústria de pré-fabricados (RCC e RCT). Os valores de módulo de elasticidade com o material ensaiado seco e úmido; a diferença entre estes dois valores; e os resultados de resistência à compressão, podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios para diferentes tipos de resíduos – Grupo A.

Resíduo	CP	R. Compressão (MPa)	Velocidade (m/s)		Módulo de elasticidade (GPa)		
			Úmido	Seco	Úmido	Seco	Diferença (%)
REF	TP	25,1	4587	4141	40,9	33,4	18,51
	TP	30,6	4598	4149	42,4	34,6	18,55
	TP	31,9	4662	4219	42,9	35,1	18,09
	TP	33,2	4566	4149	41,7	34,4	17,42
	TI	33,7	4651	4274	42,9	36,3	15,58
	TI	29,1	4525	4124	38,6	32,0	16,95
	TR	40,5	4728	4310	45,0	37,4	16,89
	TR	44,3	4728	4246	46,1	37,2	19,34
	TR	44,3	4717	4264	45,4	37,1	18,27
RCC	TPR1	30,9	4310	3846	34,4	27,4	20,38
	TPR1	30,5	4329	3752	34,9	26,2	24,87
	TIR1	47,0	4751	4320	44,1	36,5	17,32
	TIR1	49,2	4630	4255	41,9	35,4	15,52
	TIR1	45,4	4773	4310	44,5	36,3	18,46
	TRR1	43,3	4630	4184	41,6	34,0	18,32
	TRR1	54,1	4608	4149	41,5	33,7	18,93
RCT	TPR2	28,7	4444	3831	37,5	27,9	25,68
	TPR2	26,8	4464	3945	38,4	30,0	21,92
	TPR2	27,9	4525	4000	39,0	30,5	21,85
	TIR2	32,0	4396	3953	36,4	29,4	19,14
	TIR2	36,4	4464	4115	38,7	32,9	15,03
	TIR2	35,4	4464	4124	39,1	33,4	14,68
	TIR2	33,8	4405	4065	37,2	31,7	14,85
	TIR2	30,6	4525	4049	39,0	31,2	19,94
	TIR2	33,7	4630	3914	41,5	29,6	28,53
	TIR2	35,1	4566	4057	40,7	32,1	21,07
	TRR2	27,2	4367	4107	36,1	32,0	11,56
	TRR2	31,1	4405	4090	36,2	31,2	13,80
TRR2	30,1	4515	4149	38,7	32,7	15,53	

REF= Referência; RCC=Resíduo de cura convencional; RCT= Resíduo de cura térmica.

A Figura 11 relaciona os valores de módulo de elasticidade dinâmico obtidos com a velocidade ultra-sônica verificada em cada corpo-de-prova com os valores da estimativa de módulo de elasticidade dinâmico, apresentada na BS 1881 (1986). Os valores desta norma foram apresentados na Tabela 2 deste trabalho (pág. 33).

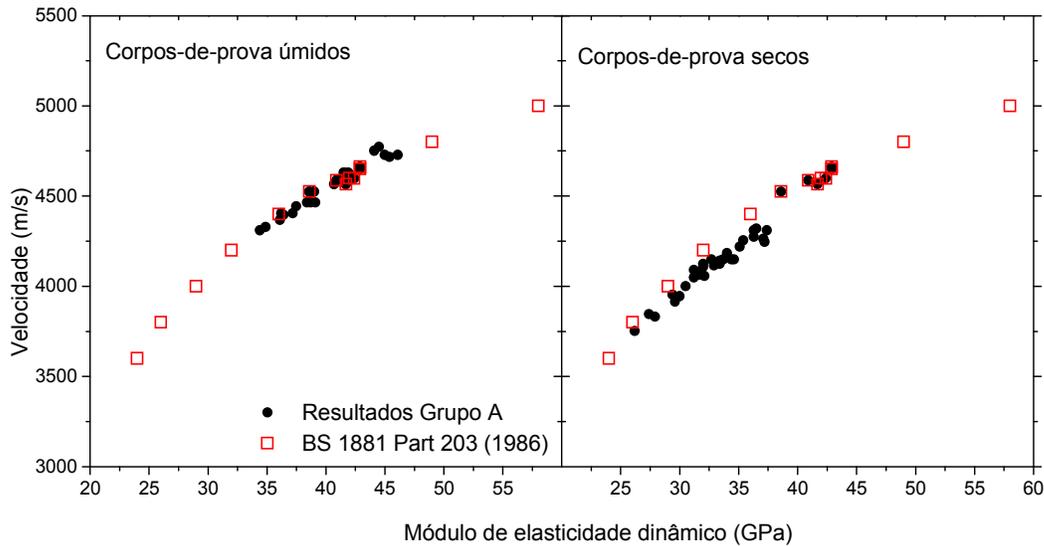


Figura 11 - Módulo de elasticidade dinâmico segundo a velocidade em m/s: comparação dos dados do Grupo A com e BS 1881 Part 203(1986).

Percebe-se que os valores encontrados estão muito próximos dos referidos na BS 1881 (1986). Entretanto, os valores obtidos em corpos-de-prova úmidos se aproximam mais dos valores da referida norma do que os obtidos em corpos-de-prova secos, que se apresentam com valores ligeiramente inferiores que o estimado pela norma.

De modo geral, analisando-se as médias na Tabela 11, pode-se dizer que o módulo de elasticidade do concreto de referência foi maior que aquele encontrado nos concretos com ARC. Essa característica já foi observada por muitos autores, como Xião, Lo e Zhan (2005), Topçu e Gunça (1995) e Katz (2003).

Ao realizar a ANOVA para verificar se existe diferença entre o módulo de elasticidade dos concretos de referência, com RCC e com RCT, pode-se perceber que, estatisticamente, eles são diferentes ao nível de significância de 1%, tanto para os concretos ensaiados no estado seco, como nos ensaiados no estado úmido (Tabela 11).

Tabela 11 – Estatística descritiva e ANOVA do módulo de elasticidade em função dos diferentes tipos de ARC

Condição de umidade	Tipo de resíduo	n	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	CV (%)	ANOVA (p<0,05)
Úmido*	REF	9	42,8981	2,3822	5,55	0,002
	RCC	7	40,4060	4,1233	10,20	
	RCT	13	38,3462	1,6396	4,28	
Seco*	REF	9	35,2833	1,8737	5,31	0,003
	RCC	7	32,7614	4,2243	12,89	
	RCT	13	31,1162	1,5751	5,06	

*as médias diferem entre si; REF = sem resíduo; RCC=Resíduo cura convencional; RCT= Resíduo cura térmica

Com isso, é possível perceber que a presença e/ou o tipo de resíduo empregado influencia no módulo de elasticidade dinâmico.

A partir desta constatação foi realizado o teste Tukey para verificar quais são as médias que diferem entre si dentro deste contexto (Tabela 12).

Tabela 12 – Estatística descritiva e teste Tukey do módulo de elasticidade em função do tipo de resíduo

Condição de umidade	Tipos resíduos	Diferença entre as médias	Teste Tukey p
Úmido	REF e RCC	2,49	0,16
	REF e RCT*	4,55	0,001
	RCC e RCT	2,06	0,235
Seco	REF e RCC	2,52	0,135
	REF e RCT*	4,17	0,002
	RCC e RCT	1,65	0,359

*as médias diferem entre si (p<0,05); RCC=Resíduo de cura convencional; RCT= Resíduo de cura térmica

Pode-se perceber que os resultados, tanto nos corpos-de-prova ensaiados no estado úmido quanto nos ensaiados no estado seco, mostraram que existe diferença entre as médias dos de referência e os produzidos com RCT. O RCC não tem diferença significativa em relação ao concreto de referência devido ao seu CV (Tabela 11) que sobrepõe os valores de módulo de elasticidade entre os dois grupos.

Foi analisado também, conforme a Tabela 13, se existe diferença entre as médias dos corpos-de-prova ensaiados úmidos e secos, dentro de cada tipo de concreto confeccionado. Verificou-se que as médias diferem entre si entre todos os concretos (REF, RCC e RCT).

Tabela 13 – Estatística descritiva e Teste t de Student do módulo de elasticidade em função da condição de umidade

Resíduo	Condição de umidade	n	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Teste t
REF*	Úmido	9	42,8981	2,3822	0,000
	Seco	9	35,2833	1,8737	
RCC*	Úmido	7	40,4060	4,1233	0,000
	Seco	7	32,7614	4,2243	
RCT*	Úmido	13	38,3462	1,6396	0,000
	Seco	13	31,1162	1,5751	

*as médias diferem entre si ($p < 0,01$); RCC = Resíduo de cura convencional; RCT = Resíduo de cura térmica

Pode-se observar na Tabela 13 que o módulo de elasticidade dinâmico é sempre maior nos corpos-de-prova ensaiados úmidos que nos ensaiados secos, independente do fato de conter ou não resíduo na sua constituição, bem como do tipo do mesmo. Aguilar et al. (2006), que coloca que a umidade da amostra afeta os resultados do módulo de elasticidade analisado em concreto sem resíduo, sendo que, segundo o autor, em concretos testados úmidos esta propriedade é cerca de 15% maior que nos testados no estado seco.

Na Tabela 14 são apresentados os valores da ANOVA para todos os corpos-de-prova, comparando os três diferentes tipos de concreto confeccionados (REF, com RCC e com RCT), no estado úmido e seco, nos traços pobres (TP), intermediários (TI) e ricos (TR).

Tabela 14 – Estatística descritiva do módulo de elasticidade e ANOVA dos diferentes traços

Resíduo	Condição de umidade	Dosagem	Média (GPa)	Des. Pad (GPa)	ANOVA ($p < 0,05$)
REF	Úmido*	TP	41,9890	0,8423	0,021
		TI	40,7820	3,1198	
		TR	45,5210	0,5647	
	Seco	TP	34,3700	0,7286	0,055
		TI	34,1650	3,0052	
		TR	37,2467	0,1716	
RCC	Úmido	TP	37,7907	5,4710	0,386
		TI	43,1925	1,8731	
		TR	41,5425	0,049	
	Seco	TP	30,0167	5,6086	0,351
		TI	35,8350	0,6576	
		TR	33,8050	0,2192	
RCT	Úmido	TP	38,3103	0,7249	0,238
		TI	38,9439	1,7791	
		TR	36,9877	1,4451	
	Seco	TP	29,4467	1,3608	0,092
		TI	31,4829	1,5118	
		TR	31,9300	0,7302	

*as médias diferem entre si ($p < 0,05$); RCC=Resíduo cura convencional; RCT= Resíduo cura térmica; REF= Referência; TP=Traço pobre; TI= Traço intermediário; TR= Traço rico

É possível observar que existe diferença significativa entre as médias apenas nos concretos REF, no estado úmido (Tabela 14). Com isso pode-se estimar que para um tipo de

resíduo, em determinada condição de umidade, ou o módulo não se altera ou que este método não tem sensibilidade suficiente para detectar estas diferenças.

Como a resistência à compressão é comumente relacionada com o módulo de elasticidade (vide Tabela 4), decidiu-se analisar esta propriedade tanto separadamente quanto relacionando-a com o módulo de elasticidade. Foi realizada a ANOVA e teste Tukey para as resistências à compressão verificadas nestes concretos, conforme exposto na Tabela 15.

Tabela 15 - Estatística descritiva, ANOVA e teste Tukey da resistência à compressão

	Tipo de resíduo	n	Média (MPa)	Des. Padrão (MPa)	CV (%)	ANOVA (p<0,05)
ANOVA	REF	9	34,79	6,72	19,32	
	RCC	7	42,93	9,01	20,99	0,002
	RCT	13	31,51	3,23	10,25	
	Tipos de resíduos	Diferença entre médias		Teste Tukey (p<0,05)		
Teste Tukey	REF e RCC*	8,14		0,036		
	RCC e RCT*	11,41		0,001		
	REF e RCT	3,27		0,444		

* as médias diferem entre si (p<0,05); RCC=Resíduo cura convencional; RCT= Resíduo cura térmica; REF= Referência.

Pode-se observar que as médias não diferem entre si apenas quando se compara os concretos sem resíduo e concretos com RCT. O fato de as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com RCT e RCC serem diferentes já havia sido percebido por Gonçalves (2011), ao analisar a resistência à compressão dos mesmos. Ela coloca que esta diferença se dá devido ao processo de cura ao qual o concreto que deu origem ao ARC foi submetido. Ainda segundo a mesma autora, os resultados encontrados na micrografia eletrônica realizada nas amostras dos resíduos utilizados apresentam uma quantidade de poros maior na amostra de RCT do que na amostra de RCC. Segundo Leite (2001) o módulo de elasticidade do concreto depende, entre outros fatores, do agregado utilizado, cujo módulo de deformação está ligado, principalmente, à sua porosidade, e é quem controla a capacidade de restrição da deformação da matriz do concreto

Na Figura 12 é apresentada a relação entre o módulo de elasticidade dos corpos-de-prova ensaiados secos e úmidos e a resistência à compressão dos mesmos.

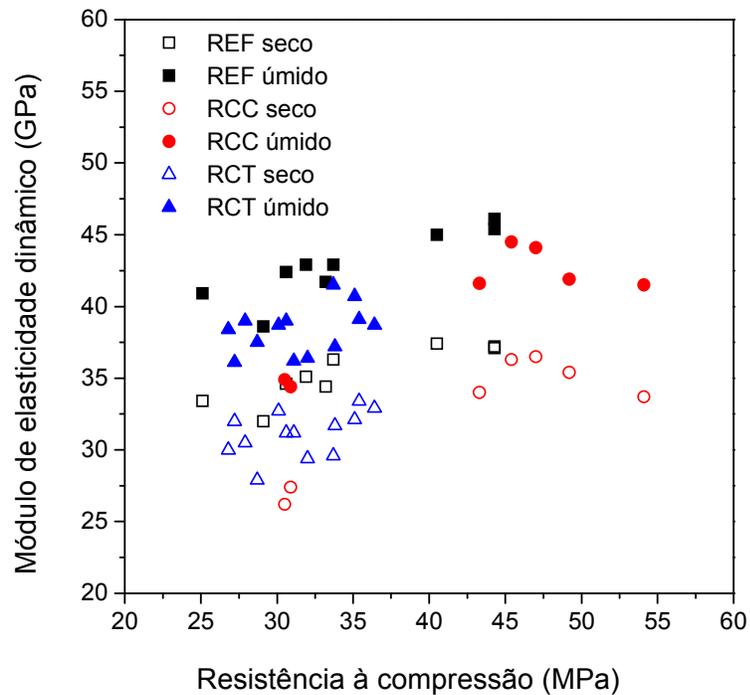


Figura 12 - Relação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade dos corpos de prova ensaiados secos e úmidos.

Percebe-se claramente que o módulo de elasticidade nos corpos-de-prova ensaiados no estado seco são menores que no estado úmido. Isso se deve ao fato de que a velocidade de propagação da onda é maior nos líquidos do que nos gases. Esta constatação está de acordo com a afirmação de Popovics (2005), que coloca que a velocidade em concreto saturado é maior que em concreto seco. Outra observação que pode ser feita é que, tanto nos corpos de prova ensaiados secos quanto nos úmidos, sem resíduo, o módulo de elasticidade tende a aumentar com o aumento da resistência à compressão. Já nos concretos produzidos com RCC e RCT não é possível visualizar este comportamento. Visualmente também é possível constatar com base na Figura 12 que as diferenças devido à influência da umidade é superior às diferenças devido à influência do uso do agregado reciclado.

Para complementar o entendimento deste comportamento, foi realizada a correlação e definido um modelo de regressão entre estas duas propriedades. A Tabela 16 e a Figura 13 apresentam os resultados deste estudo, mostrando a correlação e o modelo de regressão entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão estabelecida entre os diferentes tipos de concretos estudados no Grupo A.

Tabela 16 - Correlação do módulo de elasticidade com a resistência a compressão - Grupo B

Tipo de Resíduo	Condição de umidade	r	R ²	Equação	ANOVA	Coefficiente linear do modelo e Significância do coeficiente angular
REF	Seco	0,871**	0,7581	y=0,2425x+26,846	0,002	0,2425(p=0,002) 26,846(p=0,000)
	Úmido	0,879**	0,7787	y=0,3126x+32,024	0,002	0,3126 (p=0,002) 32,024(p=0,000)
RCC	Seco	0,862*	0,7434	y=0,4042x+15,41	0,013	0,4042(p=0,013) 15,41 (p=0,021)
	Úmido	0,844*	0,7129	y=0,3863x+23,8	0,017	0,3863 (p=0,017) 23,8 (p=0,004)
RCT	Seco	0,501	0,2519	y=0,2445x+23,412	0,099	0,2445 (p=0,099) 23,412 (p=0,000)
	Úmido	0,411	0,1688	y=0,2084x+31,779	0,171	0,2084 (p=0,171) 31,779 (p=0,000)
Total	Seco	0,605**	0,3665	y=0,245x+24,161	0,001	0,245 (p=0,001) 24,161 (p=0,000)
	Úmido	0,618**	0,3823	y=0,2657x+30,88	0,000	0,2657(p=0,000) 30,88 (p=0,000)

*Correlação significativa $p < 0,05$; **Correlação altamente significativa $p < 0,01$; RCC=Resíduo de cura convencional; RCT= Resíduo de cura térmica; REF = Referência; r=Coefficiente de correlação; R²=Coefficiente de determinação.

Quando se analisa todos os concretos juntos, observa-se que o coeficiente de correlação demonstra uma relação significativa, tanto no módulo seco como no úmido. Também se observou que o coeficiente de determinação R², que descreve a aderência da reta de regressão aos dados que foi de 0,3823 para os concretos ensaiados no estado seco e de 0,3665 para os concretos ensaiados no estado úmido, ou seja, o modelo explica 38,23 % para os secos e 36,65% para os úmidos.

Já quando analisada a correlação dos diferentes tipos de concretos separadamente, observa-se que o coeficiente de determinação aumenta tanto para os concretos REF quanto para os com RCC. O coeficiente de determinação mais alto foi encontrado nos concretos REF, sendo que nos concretos secos o R² foi de 0,7581 e, nos concretos úmidos, de 0,7787, ou seja, a proporção da variabilidade do módulo de elasticidade pode ser explicada pela variabilidade da resistência à compressão. Isso pode ser atribuído ao fato destes concretos serem mais homogêneos quando comparados aos concretos produzidos com resíduos. Com relação aos concretos com RCC, a correlação também foi forte, sendo que para aqueles ensaiados úmidos, o R² foi de 0,7129 e, para os ensaiados secos, o R² foi de 0,7434. Logo, os modelos gerados para os REF e para os com RCC são significativos (Tabela 16), representando com eficiência a relação entre as duas variáveis.

Já com relação aos concretos com RCT, mais uma vez encontrou-se um resultado diferente, sendo que o coeficiente de determinação foi muito fraco, obtendo-se valores de R^2 de 0,2519 para os secos e de 0,1688 para os úmidos (Figura 13).

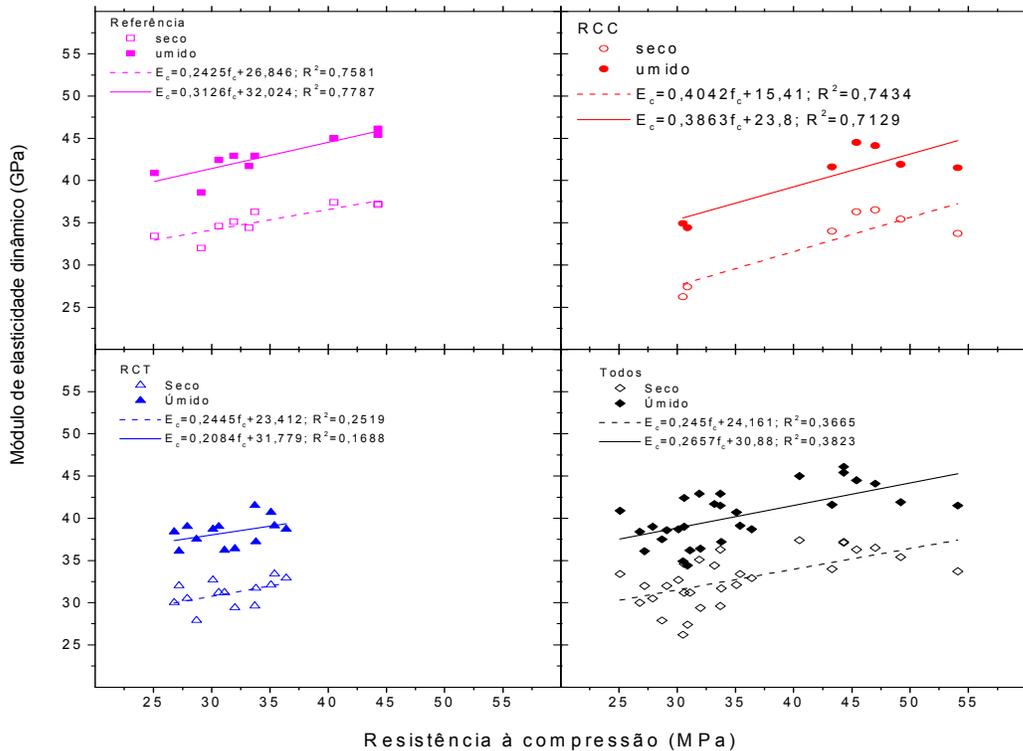


Figura 13 - Correlação entre os valores da resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Analisando os resultados de uma forma geral, percebe-se que os concretos confeccionados com RCT tiveram um comportamento bastante diferente dos concretos de REF e dos confeccionados com RCC. Como já foi mencionado anteriormente, o resíduo de cura térmica é mais poroso que o de cura convencional, o que o diferencia dos agregados convencionais e, por este motivo, concretos de REF e com RCC (menos poroso que o RCT) são mais parecidos entre si quando comparados com os RCT. Salvador Filho (2001), ao estudar as propriedades mecânicas de Concretos de Alto Desempenho submetidos a cura térmica, percebeu que a influência da duração da cura térmica foi mais sensível nos resultados de módulo de elasticidade que em relação às demais propriedades estudadas e, como se sabe, o módulo de elasticidade do agregado influencia no resultado final desta propriedade do concreto.

Com base nestas análises é importante salientar que o tipo de resíduo (cura térmica ou cura convencional), empregado no concreto como agregado, e suas características,

principalmente de porosidade, influencia de maneira significativa o valor do módulo de elasticidade, sendo esta informação de fundamental importância para a decisão de qual emprego será dado ao material.

4.2 RESULTADOS DO GRUPO B

Os concretos produzidos com diferentes teores de substituição com ARC de 18 MPa e de 50 MPa constituem o Grupo B. Os resultados do módulo de elasticidade dinâmico dos corpos-de-prova ensaiados no estado seco e úmido, a diferença, em percentual entre estes dois resultados e os valores da resistência à compressão estão apresentados na Tabela 17 e na Tabela 18.

Tabela 17– Resultados do Grupo B para ARC de 18 MPa

Teor de ARC (%)	Número do CP	Resistência a compressão	Velocidade (m/s)		Módulo de elasticidade (GPa)		Diferença seco e úmido (%)
			Úmido	Seco	Úmido	Seco	
25	1	38,4	4785	4425	47,98	41,04	14,48
	2	33,3	4651	4338	45,54	39,62	13,00
	3	32,5	4630	4184	44,80	36,59	18,32
	4	30,5	4515	4255	42,45	37,71	11,16
	5	36,9	4598	4255	43,83	37,54	14,34
	6	33,7	4878	4049	47,85	32,96	31,12
	7	31,6	4630	4228	44,20	36,87	16,58
	8	33,3	4545	4211	43,44	37,28	14,19
50	1	27,2	4587	3937	43,02	31,69	26,34
	2	32	4348	4057	38,37	33,40	12,94
	3	28,7	4444	4065	39,76	33,26	16,34
	4	31,6	4673	3752	43,95	28,34	35,52
	5	27	4444	4000	39,87	32,30	19,00
	6	25,8	4444	3992	39,68	32,01	19,32
	7	31,9	4425	4158	39,57	34,94	11,69
	8	30,7	4329	4016	37,38	32,17	13,94
75	1	23,7	4577	3922	41,34	30,35	26,58
	2	27,4	4329	3992	37,42	31,82	14,96
	3	27,7	4376	3861	38,24	29,77	22,17
	4	23,8	4474	3968	39,82	31,33	21,34
	5	26,8	4283	3876	36,31	29,74	18,09
	6	25,8	4228	3968	36,23	31,91	11,92
100	1	25,7	4320	3497	36,40	23,85	34,48
	2	25,6	4132	3766	33,55	27,87	16,92
	3	25,9	4149	3788	34,11	28,42	16,67
	4	22,2	4396	3810	38,11	28,62	24,89
	5	26	4124	3868	34,02	29,94	12,00
	6	24,69	4237	3876	35,31	29,54	16,33
	7	22,5	4444	3752	39,11	27,88	28,72
	8	23,7	4124	3839	34,03	29,49	13,34
	9	25,5	4219	3824	34,83	28,61	17,86

Tabela 18– Resultados do Grupo B para ARC de 50 MPa

Teor de ARC (%)	Número do CP	Resistência a compressão	Velocidade (m/s)		Módulo de elasticidade (GPa)		
			Úmido	Seco	Úmido	Seco	Diferença seco e úmido (%)
25	1	35,1	4831	4167	47,8	35,6	25,61
	2	35,8	4608	4310	44,1	38,5	12,51
	3	36,2	4651	4310	45,7	39,3	14,12
	4	24,4	4684	4141	44,6	34,9	21,84
	5	34,1	4556	4124	42,5	34,8	18,07
	6	36,1	4598	4283	43,8	38,0	13,23
50	1	28,8	4494	3824	41,4	30,0	27,60
	2	31,0	4484	4202	41,0	36,0	12,21
	3	30,4	4425	4124	40,43	35,1	13,15
	4	32,1	4525	4000	42,1	32,9	21,85
	5	35,1	4673	4184	44,8	35,9	19,83
	6	36,4	4515	4065	41,9	34,0	18,93
	7	33,8	4515	4202	41,5	36,0	13,38
	8	33,6	4566	4219	42,2	36,1	14,61
75	1	30,9	4598	3899	41,6	29,9	28,10
	2	26,6	4484	4167	40,8	35,2	13,66
	3	24,9	4494	3824	40,2	29,1	27,60
	4	19,6	4651	3945	43,3	31,1	28,07
	5	31,3	4415	3984	39,1	31,8	18,57
	6	28,3	4405	3876	38,7	30,0	22,59
100	1	23,3	4396	3788	38,3	28,4	25,74
	2	29,1	4396	3945	38,4	30,9	19,46
	3	25,9	4367	3883	38,0	30,1	20,91
	4	18,0	4545	3521	40,2	24,1	39,99
	5	28,3	4329	3876	37,0	29,6	19,84
	6	27,2	4310	3824	36,3	28,6	21,29
	7	24,6	4630	3824	41,8	28,5	31,77
	8	26,5	4376	3868	37,7	29,4	21,86
	9	29,4	4348	3953	37,8	31,3	17,36

A Figura 14 relaciona os valores de módulo de elasticidade dinâmico obtidos com a velocidade ultra-sônica verificada em cada corpo-de-prova com os valores da estimativa de módulo de elasticidade dinâmico, apresentada na BS 1881 (1986). A tabela que apresenta os valores desta norma pode ser visualizada na Tabela 2 deste trabalho (pág. 33).

Percebe-se que os valores encontrados nos corpos-de-prova ensaiados úmidos estão próximos dos referidos na BS 1881 (1986), enquanto os ensaiados secos apresentam uma dispersão que pode chegar a até 5 GPa com relação ao valor estimado pela Norma. Acredita-se que a diferença de comportamento com relação ao Grupo A se deve ao maior teor de substituição de agregado natural por reciclado, que se reflete na resposta dinâmica do corpo-de-prova. Nesta situação, a estimativa do módulo de elasticidade a partir da equação descrita pela ASTM C597 (2009) se afasta da estimativa realizada a partir da BS 1881 Part 203 (1986).

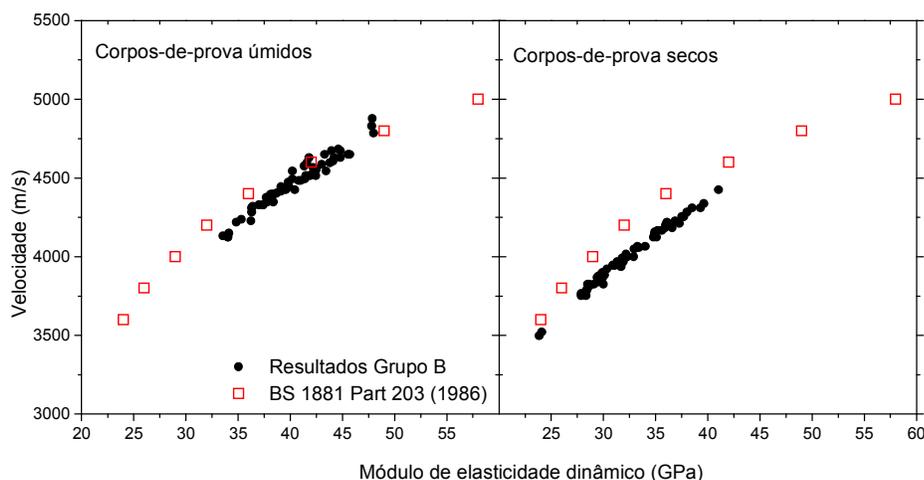


Figura 14 - Módulo de elasticidade dinâmico segundo a velocidade em m/s: comparação dos dados do Grupo B com e BS 1881 Part 203(1986).

Na Tabela 19 é possível observar por meio dos valores das médias que, quanto maior o teor de substituição do agregado natural pelo reciclado, menor o módulo de elasticidade.

Tabela 19 - Estatística descritiva e ANOVA do módulo de elasticidade em função das diferentes quantidades de resíduos

Tipo de ARC	Condição de umidade	Teor de ARC (%)	n	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	CV %	ANOVA p
18 MPa (a/c 0,85)	Úmido*	25	8	45,01	2,01	4,46	0,000
		50	8	40,20	2,22	5,51	
		75	6	38,23	2,03	5,30	
		100	9	35,50	1,98	5,57	
	Seco*	25	8	37,45	2,36	6,30	0,000
		50	8	32,26	1,90	5,88	
		75	6	30,82	0,99	3,23	
		100	9	28,25	1,80	6,38	
50 MPa (a/c 0,43)	Úmido*	25	6	44,76	1,85	4,12	0,000
		50	8	41,92	1,29	3,08	
		75	6	40,60	1,69	4,17	
		100	9	38,37	1,66	4,34	
	Seco*	25	6	36,85	1,99	5,40	0,000
		50	8	34,49	2,14	6,21	
		75	6	31,18	2,18	7,00	
		100	9	28,99	2,10	7,23	

*As médias diferem entre si ($p < 0,01$)

Com ARC de 18 MPa (a/c 0,85), verificou-se que as médias de módulo de elasticidade para substituição de agregados de 25%, 50%, 75% e 100% nos concretos ensaiados úmidos são estatisticamente diferentes ao nível de significância de 1%, ocorrendo o

mesmo resultado para os concretos ensaiados secos. O mesmo resultado ocorreu para os concretos com ARC de 50 MPa (a/c 0,43), úmido e seco (Tabela 15). Alguns autores, como Khatib (2004), Brito e Alves (2010) e Fonseca, Brito e Evangelista (2011), também observaram este comportamento em concretos reciclados.

Foi realizado o teste Tukey para verificar quais são as médias que diferem entre si (Tabela 20).

Tabela 20 - Comparação múltipla das médias do módulo de elasticidade nos diferentes teores de substituição de ARC pelo teste Tukey

Tipo de ARC	Condição de umidade	Comparação entre as médias para teor de resíduos	Diferença entre médias	Teste Tukey p
18 MPa (a/c 0,85)	Úmido	25% e 50% *	4,8125	0,000
		25% e 75% *	6,7836	0,000
		25% e 100% *	9,5159	0,000
		50% e 75%	1,9711	0,308
		50% e 100% *	4,7034	0,000
		75 % e 100%	2,7323	0,080
	Seco	25% e 50% *	5,1872	0,000
		25% e 75% *	6,6312	0,000
		25% e 100% *	9,2041	0,000
		50% e 75%	1,4440	0,495
		50% e 100% *	4,0169	0,001
		75 % e 100%	2,5729	0,067
50 MPa (a/c 0,43)	Úmido	25% e 50% *	2,8345	0,016
		25% e 75%*	4,1611	0,001
		25% e 100% *	6,3819	0,000
		50% e 75%	1,3266	0,440
		50% e 100%*	3,5474	0,001
		75 % e 100%	2,2208	0,067
	Seco	25% e 50%	2,3642	0,187
		25% e 75% *	5,6693	0,000
		25% e 100% *	7,8604	0,000
		50% e 75% *	3,3051	0,036
		50% e 100% *	5,4962	0,000
		75 % e 100%	2,1911	0,224

* médias diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

O teste Tukey demonstrou que as médias do módulo de elasticidade não diferem entre si apenas nos corpos-de-prova com teores de substituição entre 50% e 75%, e 75 e 100%, em todos os casos, com exceção dos concretos produzidos com ARC de 50 MPa ensaiados secos, onde esta diferença ficou entre os de 25% e 50%, e 75 e 100%. Com base nestes resultados é possível perceber que os diferentes teores de substituição geram alterações significativas no módulo de elasticidade dinâmico.

Para verificar se existe diferença no módulo de elasticidade do corpo-de-prova úmido com ARC de 18 MPa (a/c 0,85) em relação aos com ARC de 50 MPa (a/c 0,43), foi utilizado o teste t de Student. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 21.

Tabela 21 - Estatística descritiva e Teste t de Student do módulo de elasticidade dos corpos-de-prova ensaiados no estado úmido e seco de diferentes resistências do ARC

Condição de umidade	Tipo de ARC	n	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	CV (%)	Teste t de Student p
Úmido	18 MPa (a/c 0,85)	31	39,6943	4,1400	10,43	0,123
	50 MPa (a/c 0,43)	29	41,1332	2,7977	6,80	
Seco	18 MPa (a/c 0,85)	31	32,1569	3,9486	12,28	0,666
	50 MPa (a/c 0,43)	29	32,5850	3,6696	11,26	

As médias não diferem entre si ($p > 0,05$); CV: Coeficiente de variação.

Foi observado que, estatisticamente, ao nível de 5% de significância, as médias não diferem significativamente. O mesmo resultado foi observado para os ensaios cujos corpos-de-prova estavam secos. Este resultado está vinculado ao fato de que as faixas de resistências à compressão destes dois concretos foram muito próximas, com relação aos concretos com ARC de 18 MPa a resistência à compressão variou de 22,2 à 38,4 MPa e com relação aos concretos com ARC de 50 MPa variou de 18,0 à 36,4 MPa. Isso impossibilitou uma diferença de módulo de elasticidade significativa.

A Tabela 22 apresenta os resultados do módulo de elasticidade dos corpos-de-prova com a mesma quantidade de resíduos, porém com diferentes resistências dos agregados reciclados de concreto. Observa-se que as médias não diferem entre si, ou seja, alterando-se a resistência do ARC de 18 MPa para 50 MPa, observa-se que a diferença não é significativa para o nível de significância de 1%. Para 5% de significância existe apenas uma diferença na quantidade de resíduo de 100% no corpo de prova úmido e de 50% para o corpo de prova seco.

Também se pode observar na Tabela 22, através da média, que o módulo de elasticidade dinâmico é sempre maior nos corpos-de-prova ensaiados no estado úmidos que nos ensaiados no estado seco, independentemente do teor de substituição do ARC pelo AN e da resistência do ARC.

Tabela 22 - Estatística descritiva e Teste t de Student do módulo de elasticidade - ensaios com a mesma quantidade de resíduos e diferentes resistências de ARC

Teor de ARC (%)	Condição de umidade	Tipo de ARC	n	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	CV (%)	Teste t de Student p
25	Úmido	18 MPa (a/c 0,85)	8	45,0119	2,0096	4,46	0,822
		50 MPa (a/c 0,43)	6	44,7567	1,8456	4,12	
	Seco	18 MPa (a/c 0,85)	8	37,4511	2,3583	6,30	
		50 MPa (a/c 0,43)	6	36,8496	1,9885	5,40	
50	Úmido	18 MPa (a/c 0,85)	8	40,1994	2,2154	5,51	0,078
		50 MPa (a/c 0,43)	8	41,9222	1,2927	3,08	
	Seco*	18 MPa (a/c 0,85)	8	32,2639	1,8986	5,88	
		50 MPa (a/c 0,43)	8	34,4854	2,1407	6,21	
75	Úmido	18 MPa (a/c 0,85)	6	38,2283	2,0265	5,30	0,053
		50 MPa (a/c 0,43)	6	40,5955	1,6912	4,17	
	Seco	18 MPa (a/c 0,85)	6	30,8199	0,9944	3,23	
		50 MPa (a/c 0,43)	6	31,1803	2,1836	7,00	
100	Úmido*	18 MPa (a/c 0,85)	9	35,4960	1,9763	5,57	0,04
		50 MPa (a/c 0,43)	9	38,3748	1,6644	4,34	
	Seco	18 MPa (a/c 0,85)	9	28,2470	1,8029	6,38	
		50 MPa (a/c 0,43)	9	28,9892	2,0958	7,23	

*As médias diferem entre si ($p < 0,05$)

Analisando-se a resistência à compressão separadamente (Tabela 23), verifica-se que assim como no módulo de elasticidade (Tabela 19), as médias da resistência à compressão dos diferentes tipos de concreto diferem entre si ($p < 0,01$). Ao observar quais são estas médias que diferem entre si, é possível perceber novamente uma semelhança nos resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão (Tabela 24) e do módulo de elasticidade dinâmico (Tabela 20). Pode-se perceber que os teores de 75 e 100% de substituição não diferem entre si e que, quanto aos concretos com ARC de 50 MPa, os teores de 25 e 50% também não diferem entre si, assim como na Tabela 20, para estes concretos no estado seco.

Tabela 23 - Estatística descritiva e ANOVA da resistência à compressão do Grupo B.

Tipo de ARC	Teor de ARC (%)	n	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)	ANOVA ($p < 0,01$)
18 MPa (a/c 0,85)	25	8	33,7750	2,6375	7,81	0,000
	50	8	29,3625	2,4951	8,50	
	75	6	25,8667	1,7637	6,82	
	100	9	24,6433	1,4850	6,03	
50 MPa (a/c 0,43)	25	6	33,6167	4,5823	13,63	0,001
	50	8	32,6500	2,5411	7,78	
	75	6	26,9333	4,3519	16,16	
	100	9	25,8111	3,5547	13,77	

Tabela 24 - Comparação múltipla das médias da resistência a compressão nos diferentes teores de substituição de ARC com teste Tukey do Grupo B.

Tipo de ARC	Comparação entre as médias dos teores de resíduos	Diferença entre as médias	Teste Tukey (p<0,05)
18 MPa (a/c 0,85)	25% e 50%*	4,4125	0,002
	25% e 75%*	7,9083	0,000
	25% e 100%*	9,1317	0,000
	50% e 75%*	3,4958	0,027
	50% e 100%*	4,7192	0,001
	75 % e 100%	1,2233	0,706
50 MPa (a/c 0,43)	25% e 50%	,9667	0,963
	25% e 75%*	6,6833	0,022
	25% e 100%*	7,8056	0,003
	50% e 75%*	5,7167	0,041
	50% e 100%*	6,8389	0,004
	75 % e 100%	1,1222	0,939

*As médias diferem entre si

Na Figura 15 e na Figura 16 são apresentados os gráficos de diagrama de dispersão entre as duas variáveis.

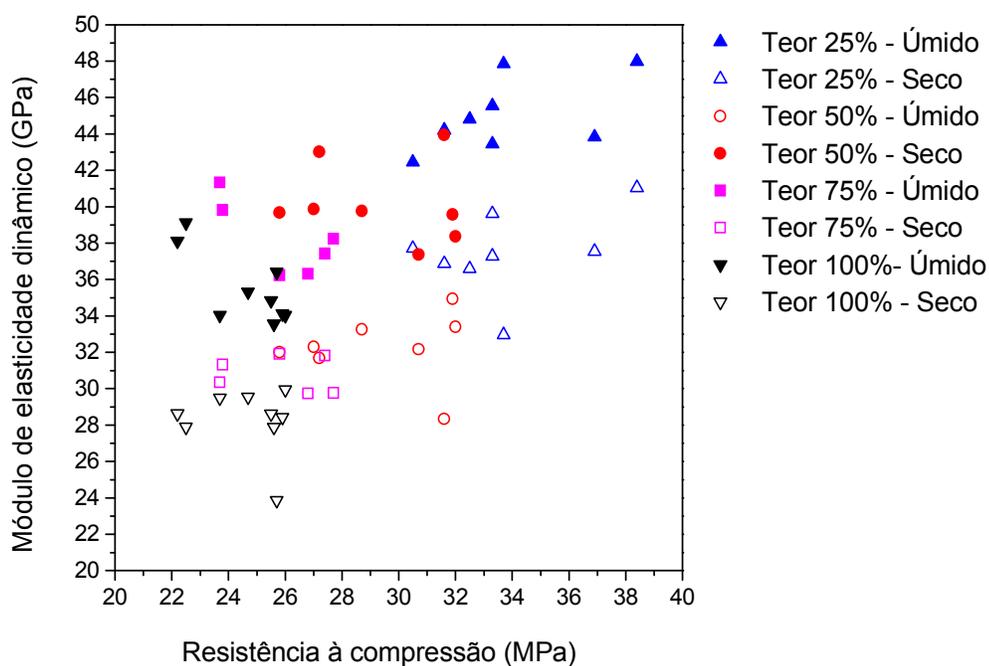


Figura 15 - Relação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade dos corpos-de-prova ensaiados no estado seco e úmido – ARC 18 MPa (a/c 0,85)

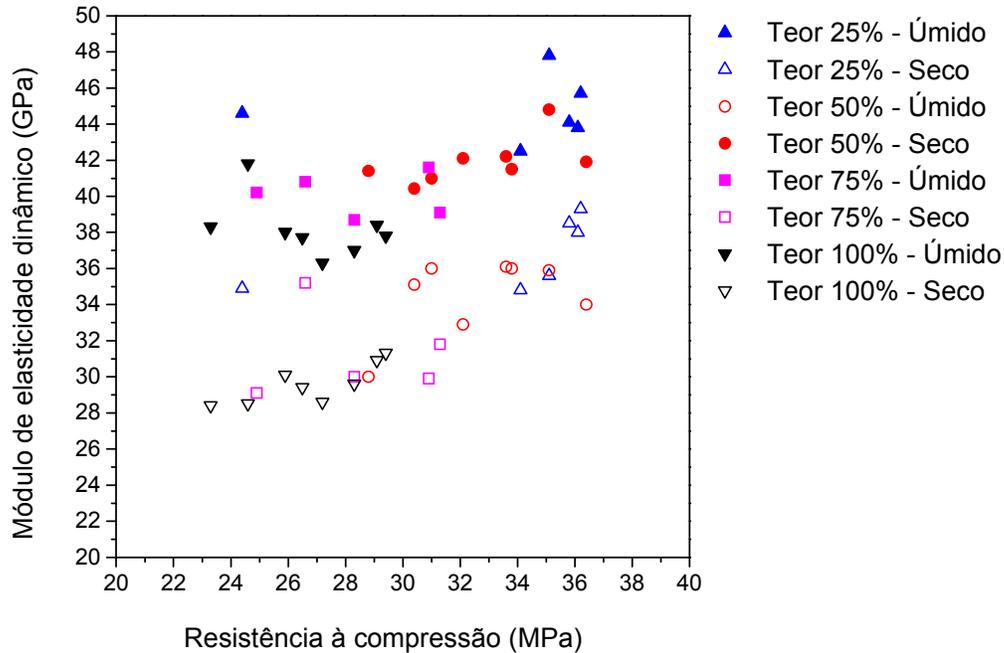


Figura 16 - Relação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade dos corpos-de-prova ensaiados no estado seco e úmido – ARC 50 MPa (a/c 0,85)

Não é possível observar, visualmente, um padrão de comportamento entre as variáveis estudadas. É possível observar que as médias de resistência a compressão axial dos concretos do grupo B variam pouco e como esta propriedade tem relação com o módulo de elasticidade, esta pequena variação dificultou a análise. Isso é confirmado ao se observar, na Tabela 20, que existe uma pequena variabilidade dos dados pelo coeficiente de variação, isto é, os dados tem uma característica homogênea. A afirmação comprova-se pelos baixos coeficientes de determinação, observados na Tabela 25.

Tabela 25 - Correlação do módulo de elasticidade com a resistência à compressão dos diferentes teores de substituição de ARC – Grupo B

Tipo de ARC	Condição de umidade	Teor de ARC (%)	r	R2
18 MPa (a/c 0,85)	Úmido	25	0,558687	0,3121
		50	-0,12922	0,0167
		75	-0,7218	0,5210
		100	-0,76583	0,5865
	Seco	25	0,407774	0,1663
		50	0,069005	0,0048
		75	-0,17108	0,0293
		100	-0,15985	0,0256
50 MPa (a/c 0,43)	Úmido	25	0,079363	0,0063
		50	0,586409	0,3439
		75	-0,64707	0,4187
		100	-0,56632	0,3207
	Seco	25	0,618866	0,3830
		50	0,5002	0,2502
		75	-0,00857	0,0001
		100	0,939521	0,8827
18 MPa (a/c 0,85)	Úmido	Total	0,731397	0,5349
	Seco		0,796012	0,6336
50 MPa (a/c 0,43)	Úmido	Tota	0,451548	0,2039
	Seco		0,779051	0,6069

r=Coefficiente de correlação; R²=Coefficiente de determinação.

5 CONCLUSÃO

Na conclusão do presente trabalho são apresentadas as respostas aos objetivos propostos no presente trabalho, assim como sugestões para futuras pesquisas.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O número de pesquisas sobre a utilização de ARC em novas matrizes de concreto vem crescendo nos últimos anos, porém, foi possível perceber que, dentre as propriedades mecânicas estudadas, o módulo de elasticidade é o menos explorado. Por esta razão e pela importância que esta propriedade tem nos projetos estruturais, este trabalho buscou contribuir com o entendimento da mesma em concretos com agregados reciclados. Neste contexto, a partir dos resultados obtidos, o presente estudo apresenta as considerações finais, respondendo aos objetivos propostos para o presente trabalho, conforme segue:

Em relação à influência do tipo de resíduo (diferentes processos de cura e resistência) no módulo de elasticidade dinâmico, pode-se afirmar com relação ao Grupo A, a pesquisa observou que a origem do agregado influencia de maneira significativa no módulo de elasticidade dinâmico. Os concretos de REF e com RCC não apresentaram diferença estatística significativa entre os valores de módulo de elasticidade. Já em comparação com aqueles produzidos com RCT, os sem ARC apresentaram um módulo de elasticidade maior. Apesar disso, visualmente, percebeu-se, de modo geral, valores superiores de módulo de elasticidade em concretos sem resíduo em relação àqueles que apresentavam resíduos em sua composição.

Analisando os concretos do Grupo B, foi possível verificar que, estatisticamente, não existe diferença entre as médias dos módulos de elasticidade dinâmico entre os concretos produzidos com ARC de 18 MPa e com ARC de 50 MPa.

Quanto às alterações no módulo de elasticidade dinâmico em função do uso de diferentes teores (25, 50, 75 e 100%) de resíduo, variável analisada apenas nos concretos do Grupo B, é possível afirmar que diferentes teores de resíduo influenciam o módulo de elasticidade e que, quanto maior o teor de substituição, menor o módulo de elasticidade. O teor de resíduo influencia mais fortemente o valor de módulo de elasticidade que a resistência do agregado reciclado utilizado.

A análise de correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão do concreto com relação aos concretos do Grupo A, percebeu-se

que, para verificar a correlação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão, é necessário analisar cada tipo de concreto individualmente (REF, com RCC e com RCT). Observou-se que a maior correlação entre estas propriedades foi nos concretos sem resíduo, onde o coeficiente de correlação (r) foi de 0,871 para os concretos ensaiados no estado seco e de 0,879 para os concretos ensaiados no estado úmido. Os concretos com RCC também obtiveram uma correlação forte, apresentando um coeficiente de correlação de 0,862 para os secos e de 0,844 para os úmidos. Os únicos concretos que tiveram uma correlação bastante fraca entre estas duas propriedades foram aqueles com RCT, que apresentaram um coeficiente de correlação de 0,501 para os secos e de 0,411 para os úmidos. Com isso, pode-se afirmar que em concretos reciclados, cada caso deve ser analisado separadamente, já que esta correlação depende do ARC utilizado.

No Grupo B não foi possível observar uma boa correlação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão. Este resultado está vinculado ao fato de que as faixas de resistências à compressão destes concretos foram muito próximas e esta pequena variação dificultou a análise.

Ao investigarem-se as diferenças no módulo de elasticidade dinâmico quando se executa o ensaio com o corpo-de-prova seco e com o corpo-de-prova úmido observou-se que existe uma diferença bastante expressiva no módulo de elasticidade dinâmico quando se executa o ensaio no corpo-de-prova seco e e no corpo-de-prova úmido, e que isto independe do tipo de agregado utilizado e do percentual de substituição de resíduo. Esta diferença ocorre de forma clara em todos os grupos analisados, e, muitas vezes, supera as demais variáveis utilizadas. A maior diferença encontrada foi nos corpos-de-prova com resíduo de cura convencional, ficando em torno de 19,11%. Portanto, é muito importante que esse parâmetro também seja considerado ao se analisar esta propriedade.

De uma forma geral, com base nos resultados desta pesquisa, pode-se afirmar que tanto o tipo quanto a quantidade de agregado reciclado de concreto utilizado em novos concretos influenciam no módulo de elasticidade dinâmico. Considerando que o ARC é um material heterogêneo, sua utilização deve ser cautelosa, pois o reaproveitamento implica na sua inserção dentro de uma matriz de concreto que também apresenta uma grande variabilidade.

Além disso, o teor de umidade deve ser um fator considerado no momento do ensaio, pois o mesmo influencia significativamente no resultado do módulo de elasticidade dinâmico, sendo que em muitos casos esta variável pode interferir mais que outras

consideradas importantes. Foi observado que ensaiando o concreto no estado úmido o valor da velocidade do pulso ultra-sônico é mais próximo dos valores apresentados na BS 1881 Part 203 (1986).

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao finalizar o trabalho, observa-se que alguns questionamentos surgidos a partir deste estudo e não puderam ser contemplados no escopo do trabalho, são formuladas as seguintes sugestões para trabalhos:

- Determinar a relação entre o valor do módulo de elasticidade dinâmico e o valor do módulo de elasticidade estático em concretos confeccionados com resíduo de concreto.
- Identificar as diferenças entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico em concretos com materiais reciclados de elevada porosidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASI, A.F.; AL-TAYYIB A, J. Effect of hot weather on pulse velocity and modulus of elasticity of concrete. **Materials and Structures**, 1990, v. 23. p. 334-340.
- ABO-QUDAIS, S.A. Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. **Construction and Building Materials**, 2005, v. 19. p. 257-263.
- AGUILAR, M.T.P.; SILVA, A.P.; CORRÊA, E.C.S.; CETLIN, P.R. Análise da capacidade de deformação do concreto: módulo de young x módulo de deformação. In: XVII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais - CBECIMAT, 2006, Foz do Iguaçu - Paraná. **Anais...**, 15 a 19 de novembro de 2006. p. 3672-3684.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**. Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 1994.
- _____. **NBR 5738**. Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 8522**. Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão – deformação. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR 10004**. Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- _____. **NBR 6118**. Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento. Rio de Janeiro, 2008.
- AJDUKIEWIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. **Cement & Concrete Composites**, 2002, v. 24. p. 269-279.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 597**. Standard method for pulse velocity through concrete. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1983.
- ÂNGULO, S.C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. 2001. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/artigo20IV_CT206_2001.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2011.
- _____; KAHN, H.; JOHN, V.M.; ULSEN, C. Metodologia da caracterização de resíduos de construção e demolição. In: Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – materiais reciclados e suas aplicações. São Paulo. **Anais IBRACON**, 2003.
- _____; CHAVES, A.P.; JOHN, V.M.; ALMEIDA, S.L.M.; LIMA, F.M.R.S.; GOMES, P.C. Análise comparativa da tecnologia de processamento na reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição. In: XXI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2005. Natal, RN, Brasil – CEFET/RN. **Anais...**, 2005, p. 305-312.
- ÁVILA, J.A.E.P.G.; GIONGO, J.S. Resistência mecânica do concreto. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.
- AZEVEDO, G.O.D.; KIPERSTOK, A.; MORAES, L.R.S. Resíduos da construção civil em Salvador: os caminhos para uma gestão sustentável. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. São Paulo, 2006, v. II, n. I. p. 65-72.
- BANTHIA, N.; CHAN, C. Use of recycled aggregate in plain and fiber-reinforced shotcrete. **Concrete International**, 2000, v. 22, n. 6. p. 41-45.

BARBOSA, I. L.S.; GEYER, A.B. Influência do agregado graúdo da Região de Goiânia no módulo de deformação tangente inicial do concreto. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. **Anais...**, 2010.

BARRA, M. **Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado**. Barcelona, 1996. 223 f. Tese (doutorado). Escola técnica Superior d'Enginyers de Camin, Canal i Ports. Universitat Politècnica de la Catalunya, 1996.

BATTAGIN, I.L.S. Módulo de elasticidade do concreto – Normalização, fatores de influência e interface com o pré-moldado. **Concrete Show**, 2008.

BENINI, H.; REPETTE, W.; CINCOTTO, M.A. Reaproveitamento de concreto fresco dosado em central com o uso de aditivo estabilizador de hidratação. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, 2007. 17 p.

BORIN, L.A.; BAUER, R.J.F.; FONSECA, L.P.T.M.D.; MARCHI, R.D.; SILVA, R.M.; FIGUEIREDO, D.A. Risco de rejeição de concretos devido à não conformidade com os parâmetros normalizados para o módulo de elasticidade. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. **Anais...**, 2010.

BRITISH STANDARD INSTITUTION, BS 1881-PART 203. **Recommendations for measurement of the velocity of ultrasonic pulses in concrete**. London, 1986. 20 p.

BRITO, J.; ALVES, F. Concrete with recycled aggregates: the portuguese experimental research. **Materials and Structures**. Abr. 2010.

BUTTLER, A.M. Agregados reciclados na produção de artefatos de concreto. **Revista do Concreto – IBRACON**. Fev. 2005. p. 26-29.

BUTTLER, A.M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto** – Influência da Idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

CAMPITELI, V.C. Porosidade do concreto. **Boletim Técnico**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1987.

CASTRO, L.O.A.; GÜNTHER, W.M.R. Impactos decorrentes de deposições irregulares de resíduos da construção civil no município de Santos, São Paulo, Brasil. In: XXIX Congresso de la Asociacion Interamericana de Ingenieria Sanitaria y Ambiental (AIDIS), 2004, San Juan. **Anais...**, CD, v. único, 2004. p. 10-10.

CAVALHEIRO, A.P. **Avaliação da viabilidade da substituição de agregado graúdo natural por agregado reciclado de concreto na fabricação de componentes estruturais pré-moldados de concreto**. 2011. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2011.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETÓN. **CEB-FIP Model Code 1990**. London: Thomas Telford, 1993.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETÓN. **CEB-FIP Model Code for Concrete Structures**. Lausanne, 1978.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução 01/1986**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>>. Acesso em: 13 jun. 2010.

_____. **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/2002.

_____. **Resolução 307, de 05 de julho de 2002**. Dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Poder Executivo. Brasília, DF, 17 jul. 2002, seção 1. p. 95-96.

COUTINHO, A.S. **Propriedades do betão**. 3. ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997. 3 v. v. 1. 401 p.

DAL MOLIN, D.C.C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. **Perdas de materiais na construção civil**. 1996. Disponível em: <<http://perdas.pcc.usp.br>>. Acesso em: 5 jan. 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Economia mineral do Brasil**. Agregados para construção civil, 2009.

DOMINGO, A.; LÁZARO, C.; GAIERRE, F.L.; SERRANO, M.A.; LÓPES-COLINA, C. Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete. **Materials and Structures**, 2010, v. 43. p. 1147-1160.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, 2007, v. 37. p. 735-742.

EUROSTAT, ENVIRONMENT AND ENERGY. **Generation and treatment of waste**. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/eurostat/>>. Acesso em: 7 dez. 2011.

EVANGELISTA, A.C.J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos**. 2002. 219 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement & Concrete Composites**, 2007, v. 29. p. 397-401.

EVANGELISTA, P.P. de A.; COSTA, D.B.; ZANTA, V.M. Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, jul./set. 2010, v. 10, n. 3. p. 23-40.

FONSECA, N.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. **Cement & Concrete Composites**, 2011, v. 33. p. 637-643.

GAGLIARDO, D.P.; VIDAL, P.A.; GAGLIARDO, J.C. Influência da granulometria do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. **Anais...**, 2010.

GLUCKLICH, J. **Proc. Int. Conf. on the Structure of Concrete**. Cement and concrete Association. Slough, U.K.: Wexham Springs, 1968. pp. 176-185.

GONÇALVES, M.S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de concreto oriundos de pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2011.

GUIMARÃES, C.O. **Avaliação do uso da água magnetizada na produção de concretos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1993. p. 349.

BUTTLER, A. M. **Concreto com Agregados Graúdos Reciclados de Concreto: Influência da Idade de Reciclagem nas Propriedades dos Agregados e Concretos Reciclados**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

INNOCENTINI, M.D.M.; PILEGI, R.G.; RAMAL JÚNIOR, F.T.; PARDO, A.R.F.; PANDOLFELLI, V.C.; BITTENCOURT, L.R. Relação entre a permeabilidade e a velocidade de secagem em concretos refratários de alta alumina. **Cerâmica**. São Paulo, 2002, v. 48, n. 37.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, 2003, v. 33. p. 703-711.

KHATIB, J. M. Properties os concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, 2005, v. 35. p. 763-769.

KOU, Shi-Cong; POON, Chi-Sun. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, 2009, v. 31. p. 622-627.

_____; _____.; ETXEBERRIA, Miren. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. **Cement and Concrete Composites**, 2011, v. 33. p. 286-291.

LEITE, M.B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo, 1997. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 1997.

_____. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e Alvenaria**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2001.

LIMBACHIYA, M.C.; LEELAWAT, T.; DHIR, R.K. Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, 2000, v. 33. p. 574-580.

LOVATO, P.S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2007.

MAGALHÃES, A.G.; CALIXTO, J.M.; PAULINO T.M.; VASCONCELOS, L.W. Módulo de deformação do concreto: ensaio estático versus dinâmico. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. **Anais...**, 2010.

MÁLIA, M.; BRITO, J.; BRAVO, M. Indicadores de resíduos de construção e demolição para construções residenciais. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, 2011, v. 11.

MARCHI, R.D.; FONSECA, L.P.T.M.D.; BORIN, L.A.; SILVA, R.M.; FIGUEIREDO, A.D. Avaliação de parâmetros de dosagem para atendimento do módulo de deformação do concreto produzido em central dosadora. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. **Anais...**, 2010.

MASCIA, T.N. **Manual**: tração, compressão e Lei de Hooke. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Departamento de Estruturas, 2006.

MEHTA, K.P.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: Pini, 2008. 674 p.

MELO NETO, A.A.; REPETTE, W. L.; CINCOTTO, M. A. Efeito do teor ativador no desenvolvimento da resistência à compressão do cimento de escória ativada com silicato de sódio. 2º Congresso Nacional da Construção, 2004. **Anais...**, 2004.

MIRANDA, L.F.R.; ANGULO, S.C.; CARELI, E.D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil:1986-2008. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, jan./mar. 2009, v. 9, n. 1. p. 57-71.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MORAIS, G.M.D. **Diagnóstico da deposição clandestina de resíduos de construção e demolição em bairros periféricos de Uberlândia**: subsídios para uma gestão sustentável. Uberlândia, MG, 2006.

NETO, S. C. Agregados para concreto. In: ISAÍIA, G.C. (Ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

NOGUEIRA, C.L.; WILLAN, K.J. Ultrasonic testing of damage in concrete under uniaxial compression. **ACI Materials Journal**. [s.l.], 2001, v. 98. p. 265-275.

OHDAIRA, E.; MASUZAWA, N. Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete-the possibility of NDE. **Ultrasonics**, 2000, v. 38. p. 546-552.

OLIVEIRA, M. J. E. **Materiais descartados pelas obras de construção civil**: estudo dos resíduos de concreto para reciclagem. Rio Claro-SP, 2002. Tese de doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, 2002.

ORTIZ, O.; PASQUALINO, J.C.; CASTELLS, F. Environmental performance of construction waste: comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. **Waste Management**, 2010, v. 30, n. 4. p. 646-654.

PEREIRA, A.H.A.; RODRIGUES, J.A. Incerteza de medição do módulo de Young de materiais por métodos não-destrutivos adotando-se um valor estimado para a razão de Piosson. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais...**, 2010.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

POPOVICS, S. Effects of uneven moisture Distribution on the Strength of and Wave Velocity in Concrete. **Ultrasonics**, 2005, v. 43. p. 429-434.

PRADO, D.M. **Propriedades físicas e mecânicas de blocos estruturais produzidos com agregados reciclados de concreto**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, 2006.

RILEM, NDT 1. **Testing of concrete by the ultrasonic pulse method**, 1972.

SAGOE-CRENTSIL, K.; BROWN, T. Guide for specification of recycled concrete aggregates (RCA) for concrete production- Final report. **Construction and Engineering**. Austrália: CSIRO, Building, 1998.

SANTOS, S.B.; GAMBALE, E.A.; ANDRADE, M.A.S. Modelos de predição do módulo de elasticidade do concreto. In: 48º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. **Anais...**, 2006.

SALVADOR FILHO, J.A.A. **Cura térmica dos concretos de alto desempenho**: análise das propriedades mecânicas utilizando o método da maturidade. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. São Paulo, 2001.

SCHULZ, R.R.; HENDRICKS, F. Recycling of masonry rubble. In: HANSEN, T.C. (Ed.). **Recycling of demolished concrete and masonry**. Londres: E&FN Spon, 1992. Parte 2.

SHEHATA, L.D. Deformações instantâneas de concreto. In: ISAÍIA, G.C. (Ed.). **Concreto**: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

SILVA, E. F. **Concreto de alto desempenho**: estudo de propriedades mecânicas. 1997. 166 f. Dissertação (Mestre em Estruturas) – Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília. Brasília, 1997.

SILVA, R.W.C.; ARNOSTI JÚNIOR, S. **Caracterização do resíduo de construção e demolição (RCD) reciclado**. Rio Claro, SP: Holos Environment, Centro de Estudos Ambientais, 2006, v. 5, n. 2.

SOUZA, A.S. **Utilização de resíduo de concreto como agregado miúdo para argamassa de concretos estruturais convencionais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

SOUZA, U.E.L. **Mitos e verdades sobre o desperdício em obras**, 1998.

_____; PALIARI, J.C.; AGOPYAN, V.; ANDRADE, A.C. Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, out./dez, 2004, v. 4, n. 4. p. 33-46.

STANDARD TEST METHOD FOR PULSE VELOCITY THROUGH CONCRETE. Designation: C597 - 09. **ASTM International**, 2000. 4 p.

TAM, V.W.Y. Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. **Resources, Conservation and Recycling**, 2008, v. 53. p. 821-828.

TOPÇU, I.B.; GÜNÇAN, N.F. Using waste concrete as aggregate. **Cement and Concrete Research**, 1995, v. 25. p.1385-1390.

_____; SENDEL, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, 2004, v. 34, p.1307-1312.

TROIAN, A. **Avaliação da influência do agregado reciclado de concreto na penetração de íons cloreto**. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2010.

VOGT, C. J. **Estudo da influência de adições no módulo de elasticidade dinâmico na resistência à fadiga e na tenacidade à fratura para concretos convencionais**. 2006. 107 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

WERLE, A. P. **Estudo da influência do agregado reciclado de concreto na carbonatação de concretos**. 2010. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2010.

XIÃO, J.; LI, J.; ZHANG, C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**, 2005, v. 35. p. 1187-1194.

ZEGA, C.J.; ZACCARDI, V.A.Y.; MAIO, D.A.A. Effect of natural coarse aggregate type on the physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates. **Materials and Structures**, 2010.

ANEXOS

Quantidades de materiais e traços empregados nas misturas – Grupo A

SIGLA	Traço (c:a:b)	a/c	Teor de ARC (%)	Quantidades (Kg)							Aditivo (g)	Slump (mm)	
				Cimento	Cinza volante	Areia	Brita Natural	ARC	Água	Água de compensação		Inicial	Ajustado
TP	1:2,78:3,10	0,58	0	6,461	0,969	17,987	20,000	0	4,478	0	29,7	115	180
TP	1:2,78:3,10	0,58	0	6,461	0,969	17,987	20,000	0	4,478	0	29,7	110	205
TP-RCC	1:2,78:3,10	0,61	50	6,461	0,969	17,987	10,000	9,710	4,478	0,273	27,2	80	200
TP-RCC	1:2,78:3,10	0,61	50	6,461	0,969	17,987	10,000	9,710	4,478	0,273	26,0	120	200
TP-RCT	1:2,78:3,10	0,62	50	6,461	0,969	17,987	10,000	9,880	4,478	0,413	17,2	120	215
TP-RCT	1:2,78:3,10	0,62	50	6,461	0,969	17,987	10,000	9,880	4,478	0,413	5,9	160	210
TI	1:2,23:2,65	0,50	0	7,560	1,134	16,888	20,000	0	4,239	0	34,8	120	175
TI	1:2,23:2,65	0,50	0	7,560	1,134	16,888	20,000	0	4,239	0	34,8	100	170
TI-RCC	1:2,23:2,65	0,52	50	7,560	1,134	16,888	10,000	9,710	4,239	0,273	33,0	35	170
TI-RCC	1:2,23:2,65	0,52	50	7,560	1,134	16,888	10,000	9,710	4,239	0,273	13,6	25	170
TI-RCT	1:2,23:2,65	0,53	50	7,560	1,134	16,888	10,000	9,880	4,239	0,413	19,1	100	200
TI-RCT	1:2,23:2,65	0,53	50	7,560	1,134	16,888	10,000	9,880	4,239	0,413	11,8	140	185
TR	1:1,68:2,20	0,42	0	9,109	1,366	15,339	20,000	0	4,429	0	32,4	80	190
TR	1:1,68:2,20	0,42	0	9,109	1,366	15,339	20,000	0	4,429	0	30,3	85	175
TR-RCC	1:1,68:2,20	0,44	50	9,109	1,366	15,339	10,000	9,710	4,429	0,273	53,0	30	175
TR-RCC	1:1,68:2,20	0,44	50	9,109	1,366	15,339	10,000	9,710	4,429	0,273	50,5	45	185
TR-RCT	1:1,68:2,20	0,45	50	9,109	1,366	15,339	10,000	9,880	4,429	0,413	48,4	55	170
TR-RCT	1:1,68:2,20	0,45	50	9,109	1,366	15,339	10,000	9,880	4,429	0,413	50,2	40	180

Teor de argamassa (α) = 55%. Abatimento = 180±20mm

Fonte: Gonçalves (2011)

Propriedades químicas, físicas e mecânicas do CPV – ARI – Grupo B

PROPRIEDADES QUÍMICAS DO CPV – ARI

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO	NORMA UTILIZADA	RESULTADOS
Dióxido de silício (SiO ₂)	NBR 14656	18,67
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	NBR 14656	4,07
Óxido de cálcio (CaO)	NBR 14656	59,90
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	NBR 14656	2,56
Óxido de magnésio (MgO)	NBR 14656	5,31
Óxido de enxofre (SO ₃)	NBR 14656	3,02
Perda ao fogo (%)	NBR NM 18	3,32
CaO Livre	NBR NM 12	1,70
Resíduos insolúveis	NBR NM 15	0,64
Equivalente alcalino	NBR 14656	0,63

PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CPV – ARI

Expansibilidade a quente	NBR 3435	0,85
Tempo de início de pega (hora: min.)	NBR NM 65	2:22
Tempo de fim de pega (hora: min.)	NBR NM 65	3:04
Consistência Normal	NBR NM 43	28,5
Blaine (cm ² /g)	NBR NM 76	4.347
Retido na # 200 (%)	NBR 11579	0,16
Retido na # 325 (%)	NBR 9202	1,91
Resistência à compressão 01 dia (MPa)	NBR 7215	20,5
Resistência à compressão 03 dias (MPa)	NBR 7215	33,8
Resistência à compressão 07 dias (MPa)	NBR 7215	40,5
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	NBR 5733	48,6
Massa Específica (g/cm ³)	NBR NM 23	3,12

Fonte: Adaptado de Werle (2010) e Troian (2010)

Propriedades químicas, físicas e mecânicas do cimento CP V- ARI – Grupo A

Propriedades Químicas do CP V-ARI		
Composição química do cimento	Resultados (%)	
Dióxido de Silício (SiO ₂)	18,48	
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	4,05	
Óxido de Cálcio (CaO)	59,68	
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	2,53	
Óxido de Magnésio (MgO)	5,24	
Óxido de Enxofre (SO ₃)	3,05	
Perda ao fogo	3,23	
CaO Livre	0,91	
Resíduos insolúveis	0,65	
Equivalente alcalino	0,64	
Propriedades físicas e mecânicas do CP V-ARI		
Expansibilidade a quente (mm)	0,80	
Tempo de pega (min)	início	2,42
	fim	3,18
Consistência Normal	28,74	
Blaine	4,341	
Retido na # 200	0,40	
Retido na # 325	3,00	
Massa Específica (g/cm ³)	20,8	
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	33,12
	3 dias	34,6
	7 dias	41,7
	28 dias	51,3

Fonte: Gonçalves (2011)

Caracterização granulométrica do agregado graúdo natural (AN) – Grupo B

Abertura de Peneira # (em mm)	Massa Retida (%)	Massa Acumulada (%)
25 mm	0	0
19 mm	2	2
12,5 mm	60	62
9,5 mm	32	94
6,3 mm	6	100
4,8 mm	0	100
< 4,8 mm	0	100
Dimensão Máxima Característica mm	19	
Módulo de Finura	6,96	
Massa específica (g/cm ³)	2,75	
Massa Unitária (g/cm ³)	1,49	

Fonte: Adaptado de Werle (2010) e Troian (2010)

Composição granulométrica dos agregados graúdos naturais – Grupo A

Peneiras (aberturas)	Massa (%)	
	Retida	Acumulada
	Brita 1	
19 mm	0	0
12,5 mm	21,33	21,33
9,5 mm	27,35	48,68
6,3 mm	37,02	85,70
4,75 mm	9,78	95,48
< 4,75 mm	4,52	100
Total	100	100
Dimensão Máxima Característica (mm)		19

Fonte: Gonçalves (2011)

Caracterização granulométrica do agregado miúdo natural – Grupo A e B

Abertura de Peneira #	Massa Retida (%)	Massa Acumulada (%)
4,8 mm	3	3
2,4 mm	11	14
1,2 mm	18	32
0,6 mm	18	50
0,3 mm	27	77
0,15 mm	20	97
0,075 mm	3	100
<0,15 mm	3	100
Dimensão Máxima Característica (mm)		4,8
Módulo de Finura		2,73
Massa específica (g/cm ³)		2,49
Massa Unitária (g/cm ³)		1,61

Fonte: Adaptado de Werle (2010) e Troian (2010)

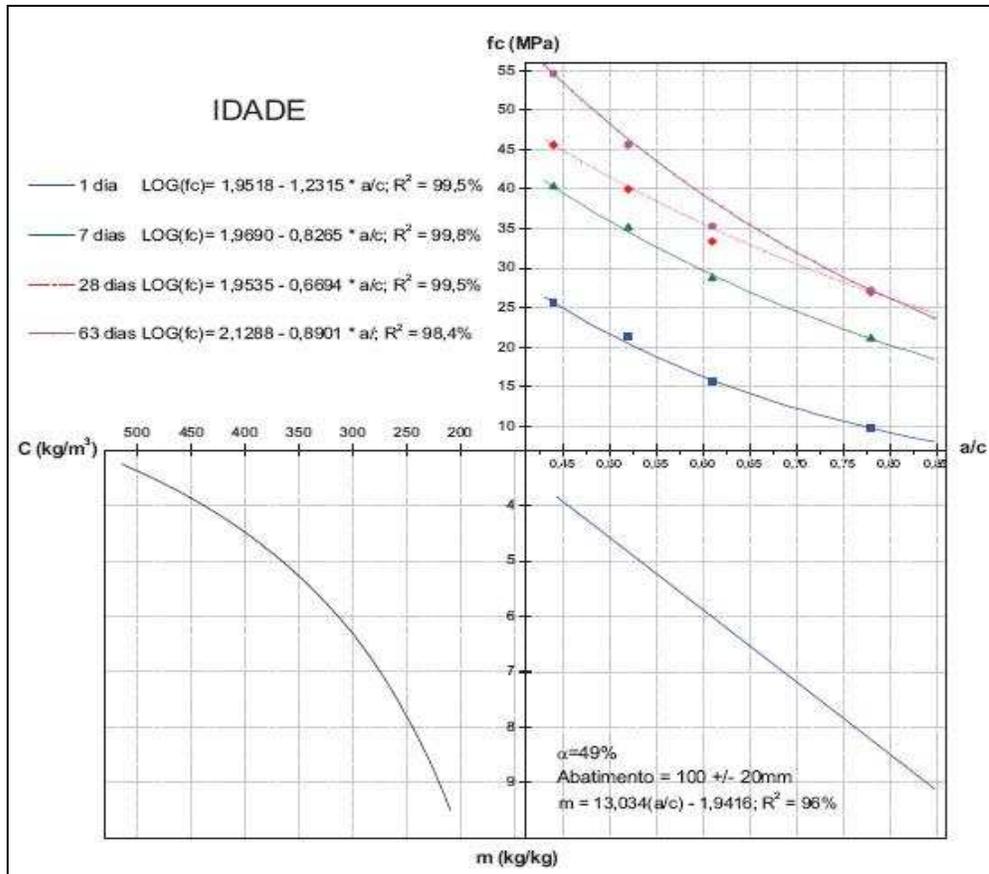


Diagrama de dosagem do concreto – Grupo B

Fonte: Werle (2010) e Troian (2010)

Caracterização granulométrica dos agregados reciclados de concreto (ARC) de 18, 37 e 50 MPa – Grupo B

Abertura de Peneira #	ARC 18 MPa (63 dias)		ARC 50 MPa (63 dias)	
	Massa Retida (%)	Massa Acumulada (%)	Massa Retida (%)	Massa Acumulada (%)
25 mm	1	1	1	1
19 mm	13	14	18	19
12,5 mm	54	68	45	64
9,5 mm	9	77	9	73
6,3 mm	9	86	9	82
4,8 mm	4	90	5	87
< 4,8 mm	10	100	13	100
Dimensão Máxima Característica (mm)	25		25	
Módulo de Finura	4,36		4,26	

Fonte: Adaptado de Werle (2010) e Troian (2010)

Caracterização física dos ARC – Grupo B

Tipo de ARC	Dimensão Máxima Característica (mm)	Módulo de Finura	Massa Específica (g/cm ³) – NM 53/2002	Massa Unitária (g/cm ²) – NM 45/1995
18 MPa	25	4,36	2,50	1,21
50 MPa	25	4,26	2,49	1,21

Fonte: Adaptado de Werle (2010) e Troian (2010)

Composição Granulométrica do ARC para diversas idades de cura submersa – Grupo A

Peneira (mm)	Massa Retida Acumulada (%)					
	ARC-RCT			ARC-RCC		
	7 dias	28 dias	63 dias	7 dias	28 dias	63 dias
< 4,75 mm	3,68	7,69	9,94	16,83	17,12	21,44
4,75	8,37	12,59	13,74	22,40	22,48	25,90
6,30	19,55	23,67	23,29	35,75	35,08	39,29
9,50	28,84	33,81	33,12	44,55	43,33	48,57
12,50	75,34	79,89	81,43	78,52	82,75	85,89
19,00	97,13	99,41	97,94	96,68	97,71	96,58
25,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Gonçalves (2011)